

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Издание | 3 |
| Глава I. Развитие печной техники и роль тепловой обработки в производстве силикатных материалов | |
| § 1. История развития стекловаренных печей | 5 |
| § 2. История развития печей для производства керамических изделий | 7 |
| § 3. История развития печей для производства стеклящих материалов | 9 |
| Глава II. Общие понятия о печах и сушильках по производству силикатных материалов | |
| § 4. Физико-химические и тепловые процессы, протекающие в печах и сушильках | 11 |
| § 5. Классификация печей и сушилок | 14 |
| § 6. Схемы устройства и работы изобретенных распространенных печей | 21 |
| Глава III. Особенности технология в печах и сушильках силикатных производств | |
| § 7. Химическая природа работы печей | 25 |
| § 8. Радикальный режим работы плавильных печей | 27 |
| Глава IV. Движение газов и сушильки по производству силикатных материалов | |
| § 9. Виды движения газов | 31 |
| § 10. Вентиляция и интеграция циркуляции газов | 32 |
| § 11. Приспособления для перемещения газов | 38 |
| Глава V. Топливо и его сжигание в печах и сушильках по производству силикатных материалов | |
| § 12. Виды и свойства топлива | 41 |
| § 13. Проведение горения топлива | 42 |
| § 14. Устройства для сжигания топлива | 43 |
| § 15. Выбор топлива и методы его сжигания | 45 |
| Глава VI. Печи и сушильки в технологии силикатных материалов | |
| § 16. Сушильки для силикатных материалов | 60 |
| § 17. Печи в производстве керамических изделий | 63 |
| Глава VII. Печи для обжига керамических изделий | |
| § 18. Печи периодического действия | 65 |
| § 19. Печи непрерывного действия | 67 |
| Глава VIII. Печи для производства стекла | |
| § 20. Классификация стекловаренных печей | 132 |
| § 21. Горячекоксыные печи | 134 |
| § 22. Балансные печи | 139 |
| § 23. Электрические и ионно-электрические печи | 175 |
| § 24. Вакуумогазовые печи | 182 |
| § 25. Технологии режимов стекловаренных печей | 187 |
| § 26. Автоматизация управления и регулирования теплового режима | 197 |
| Глава IX. Печи для обжига вяжущих материалов | |
| § 27. Основные физико-химические процессы, протекающие при тепловой обработке цементной сырьевых смесей | 199 |
| § 28. Вращающиеся печи для производства цементного клинкера | 201 |
| § 29. Альтернативный и тепловой блинцы цементогенерирующей печи | 233 |
| § 30. Определение теплового и технологического коэффициентов полезного действия | 238 |
| § 31. Определение тепловой мощности печи | 258 |
| § 32. Избыточные устройства | 260 |
| § 33. Альтернативные печи | 241 |
| § 34. Автоматизация процесса обжига клинкера | 242 |
| Приложение литературы | 247 |
| Предметный указатель | 248 |

И. А. БУЛАВИН, И. А. МАКАРОВ,
А. Я. РАГОПОРТ, В. К. ХОХЛОВ

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Допущено

Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебника для студентов

высших учебных заведений,

обучающихся по специальностям:

«Химическая технология вяжущих материалов»,

«Химическая технология керамики и огнеупоров».

«Химическая технология стекла и ситаллов».



МОСКВА СТРОИЗДАТ 1982

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

A

Автоматизация варки стекла 197, 198
— обжига керамических изделий 107, 108
— 117
— обжига цементного клинкера 238, 237

Антракт, виды и свойства 46

B

Баланс материальный 51, 244–246
— тепловой 86, 92, 166, 168, 206–208
Бернулли уравнение 36
Бюро критерий 26

C

Вентилятор центробежный высокого давления 38
— низкого 39
— среднего 40
Высокоплавкость 60

D

Газ (движение) 35, 144, 145, 167, 188
Газ генераторный 44, 45
— дымовой 60
— пропановый 44
Гомогенизация стекломассы 153, 160–169
Горелка для газообразного топлива 60
— 107, 116, 227
— насыщенным топливом 55, 226
График критерий 26

E

Декарбонизатор выносной 217–222

F

Завеса воздушная 95, 107
— газовая 107

K

Кальциниатор конвейерный 222, 223
Клинкер цементный 15, 199
Котел угольный 176, 175
Коэффициент избытка воздуха 48, 185, 204
— излучения 32
— изометрический 54
— изотермического 238
— теплопередачи 35, 173, 174, 206
угольной 34

M

Магнит, виды и свойства 45
Менделеев уравнение 43, 44

N

Напор статический 36
— динамический 36

Напор статический 36
Номограмма подбора вентилятора 39–40
Нуссельта критерий 28–31, 205

O

Обжиг известняка 16, 242
— керамических изделий 7, 17, 175
— цементного клинкера 9, 199
Отжиг 162

P

Печи, классификация, принцип действия 16, 17, 132–134
Печь обжига керамики непрерывного действия 134–135
конвекционная 134–135
изофазная 105, 110, 111, 113
турбинная 97

Печь обжига керамики периодического действия 135
горячая 77–86
камерная 76
компактная 89, 90–92

многокамерная 89–93
Печь обжига клинкера
мокрого способа производства 9,
208–209
сухого 9 — 16, 212–217
с механическим обезвоживанием 211, 212

во взвешенном состоянии 215
шахтная 21, 22, 24, 242
Печь отжига 163–187
Печь стекловарения непрерывного действия 9
зашлаковая 145–147
конструкции. Более 154
— Ферросилик 151
— Чугуев 143

пламенно-электрическая 179–184
прямого нагрева 147–152
с погружными термоканами 155
пламенно-каскадная 166
электрическая 173–179

Печь стекловарения периодического действия 9
зашлаковая 140–142
терракотовая 134–139

Питатель шахты 232

R

Регенератор, классификация конструкции 1
трубные элементы 167–169
— расчет 167–172

Рекуператор, классификация, конструкции 1
трубные элементы 172–173
— расчет 173–175

S

Садки керамических изделий 106, 237

Савица горячая 46

Сопротивление движению 220–221

— частичное 37

— от трения 37

— от геометрического напора 37

Стендомасса (движение) 191–192

Сушка, способы и закономерности 16, 17

Сушки бирюзовая 60, 61

— ленточная 61, 62

— шахматическая 62

— распылительная 63

камерная 64

конвективная 69–73

— конвектическая 69–73

радикационная 73

— турбинная 65–69

Т

Температура действительная 31

— калориметрическая 81

— в максимуме 81

— подогрева воздуха 52

— творческая 81

Теплообмен конвективный 22–23

— радиационный 29–35, 163–169

— слоевой 190, 191

Топливо, свойства и горение 41–44, 47–52

— газообразное 44, 45

— жидкое 45, 46

— твердое 46, 47

У

Установка клинкера барабанный 228

— колоночный 228–231

— рекуператорный 228

— с конвекцией решеткой 232

Установка барабанная 240, 241

Иван Анисимович Булибин, Игорь Алексеевич Махаров, Абрам Яковлевич Рапонев, Валентин Кузьмич Хочин

ГЛАВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ СИЛИКАТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Научный редактор профессор Е. Н. Трофимовский
Научный редактор П. Н. Филиппов

Научный редактор А. П. Заслуженный Технический редактор В. Д. Ильин
Корректор И. П. Чугунова

ИБ № 1963

Лицо в набор 16.02.89
Подписано в печать 17.06.89 Т.1329
Формат 70x100/16
Бумага офсетная № 1 Гарнитура «Лигатура» Нижегородская
Издательство «Мир» Усл. печ. л. 112 Усл. кр.-отт. 155 Тираж 3000 экз. Изд. № А1230, Вып. № 100

Стройиздат, 101442, Москва, Краснопресненский б-р, 16
Московская типография № 4 Союзполиграфии
им Г. Г. Достоевского, комитета ОССР
— редакция, службы полиграфии и книжной торговли
127011, Москва, ул. В. Перовская, 24

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые процессы в технологии силикатных материалов охватывают большой комплекс технологических процессов, осуществляемых при работе тепловых установок (печей и сушилок). Этот комплекс объединяет процессы сжигания топлива, передвижения печных газов, организацию теплопередачи и утилизации тепловой энергии в единую систему, характеризующую работу и конструкцию тепловых установок. Качество выпускаемой продукции и ремонтоспособность различных силикатных производств во многом определяются работой тепловых установок и зависит от правильности выбора конструкции, осуществляемых в них, и от правильности выбора конструек.

При нагревании сырьевых смесей или отформованных из керамической массы изделий по специально разработанным режимам протекает взаимодействие отделяемых кристаллических фаз и расплавов. В результате таких процессов из механической смеси исходных материалов получают либо однородный расплав (стекломассу) для формования изделий, либо спекшийся цементный клинкер, либо керамические изделия.

Запрограммированные свойства материалов или изделий достигаются в результате физико-химических процессов, протекающих при нагреве исходной шихты или изделий до высоких температур ($800 - 2000^{\circ}\text{C}$) в печах различного типов и конструкций. Печи проектируют в соответствии с особенностями протекающих в них процессов и требованием, предъявляемыми к выпускаемой продукции.

Печи для получения стекломассы (варки стекла), для обжига цементного клинкера и для выжига керамических изделий резко отличаются между собой по устройству.

В производстве элемента гранулы клинкера, полученного в печи, размываются в шаровых мельницах, где свойства отдельных гранул усредняются в конечном продукте — цементе. Поэтому неизменчивая неоднородность состава и размеров гранул не нарушает однородности цемента и стабильность его свойств. Вместе с тем производство цемента по экономическим соображениям требует большого выпуска продукции с одной печи, поэтому применяют мощные вращающиеся печи длиной до 185 м и диаметром до 5 м.

Для производства стекла важны освобождение стекломассы от газовых включений и ее гомогенизация. При большой влажности стекломассы эти процессы протекают медленно и требуют для своего завершения длительных температурных выдержек, чем и объясняются большие размеры бассейнов ванных печей.

Керамические изделия при обжиге сокращаются в размерах, дают «садку» и при неравномерном нагреве деформируются или растрескиваются. Если учсть, что размеры изделий кислотоупорной и электроизоляционной керамики при сложной их форме достигают 2 м и более, то станет понятным столь ность приспособления и эксплуатации керамических туннельных печей длинной до 160 м, применявшихся на современных заводах. Отмеченные три типа печей преобразились на современных заводах, так как являются наиболее производительными и надежными в эксплуатации.

ГЛАВА I. РАЗВИТИЕ ПЕЧНОЙ ТЕХНИКИ И РОЛЬ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

§ I. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В глубокой древности наши предки знали, что изготовленные из глины сосуды становятся после обжига в пламени костра более прочными и не размокают в воде, а из песка и древесной золы с помощью пламени костра можно получать стекло для формования прimitивными приемами украшений, игрушек и т. д.

Затем стали ограждать костер стенами. Таким образом был сделан переход к своеобразному прототипу напольной печи, в которой твердое топливо загружали в печь послойно вместе с обжигаемым материалом или скижали в прimitивных топках при обжиге керамических изделий. Обнаруженные в Египте следы производства изделий из стекла за 1600 лет до н. э. указывают на использование (виду низкой температуры скижания топлива в кострах) двухстадийного способа варки стекла в глиняных сковородах, прототипах горшков в современных печах периодического действия.

Археологическими раскопками также подтверждено, что глиняные сковороды диаметром до 250 мм и высотой до 130 мм устанавливали на глиняные подставки в центре печи, пристосовленной для скижания сухих дров. Предполагается, что на первой стадии из шихты известково-натриевого стекла с высоким содержанием щелочей, избыком содержанием окиси алюминия Al_2O_3 , получали фритту из легкоплавких силикатов. На второй стадии в результате удаления из дробленой фритты кусков с остатками непроявленного к18-цветного песка шихта приобретала состав, приемлемый для варки стекла при достигаемых в те времена температурах. Печи с отличительными их признаками — печной камерой, топками, организованной циркуляцией и отводом печных газов — появились в связи с расширением производства стекла после изобретения трубок для выдувания стеклянной посуды. Двухстадийную варку стекла проводили вначале в двух отдельных горшковых печах, третья печь предназначалась для отжига изделий. Сохранились описания древней прямугольной печи (3 × 5 м) с двумя отделениями (Геофил, XII в.) и двух горшковых печей, в одной из которых фриттуется шихта, а в другой (диаметром 2,4 м, высотой 3,7 м) варится стекло из фритты (Агроном, XVI в.). В первом этаже размещена топка с вылетом пламени в центр пода второго этажа, вокруг которого расположены шесть горшков. В стенах топки имеются окна для загрузки горшков и выработки стекла. Тигли вмещали 80–100 кг стекломассы. Третий этаж печи использовали для отжига изделий, загружаемых в муфельную коробку.

В XIX в. в качестве топлива стали использовать каменный уголь. На базе такого вида топлива появились печи, в которых все процессы стекловарения осуществляли в одном горшке. В больших печах

устанавливали до 16 горючих виситомостью каждый 260—460 кг стекломассы. Размеры горшка: диаметр (верхний) 1250—1500 мм, высота 580—930 мм. Расход сухих дров на варку стекломассы — 4—5 кг стекломассы, а на ее выработку — 2—3 кг кг.

В более поздних конструкциях горючих печей для повышения температуры варки стекла и снижения расхода твердого топлива использовали полугазовые топки. В этот же период появляются горючие печи, работающие на жидким топливом, природном и генераторном газах.

Быстрое распространение печей, работающих на генераторном газе, связало с изобретением регенераторов (1856 г.), предназначенных для использования тепла отходящих из печи отработанных газов на подогрев топлива и воздуха. Внедрение регенераторов позволило применять низкосортные виды твердого топлива. Применившиеся в это время в некоторых печах рекуператоры из стальных и чугунных труб быстро окислялись при подогреве воздуха выше 400 °С и не могли конкурировать с регенераторами.

Горючие печи с регенераторами работают с нижним или верхним пламенем. В печах с нижним пламенем скжигание нагретого в регенераторе газа с использованием горячего воздуха начинается в каналах (казах), заложенных под подом печи, и заканчивается в круглой печной камере. В этой камере печные газы омываются установленные на поди горючими, удаляются через каналы в регенераторы и затем в атмосферу. В печах с нижним пламенем быстро изнашиваются горшки и под кадиль, поэтому их применяют при невысокой температуре варки стекла. Для варки тугоплавких стекол применяют горючие печи с верхним пламенем и расположением влетов горелок выше горючих. В России 12- и 16-горючевые печи с нижним пламенем использовали для производства посуды, зеркального и тому подобного стекла на полуавтоматах и ручным способом.

В конце XIX и начале XX столетия горючевые печи, предназначенные для производства разнообразного стекла, заменили ванные регенеративными печами непрерывного действия с поперечными и подковообразным движением пламени.

Дальнейшее усовершенствование ванных печей продолжалось в XX в. Оно шло в направлении повышения производительности печей и температуры варки стекломассы. Усовершенствование таких печей оказалось возможным в результате использования для них электроплавленых коррозионно-стойких огнеупоров, высококачественного жидкого топлива и природного газа.

Разработка конструкций высокопроизводительных автоматов для формования листового стекла разного назначения, посуды, стеклянной тары, разнообразных изделий для машиностроения и других отраслей народного хозяйства обусловила резкое увеличение производительности ванных печей. Площадь, форма и число каналов для отбора стекла определяются в разных вариантах печей количеством устанавливаемых стеклоформовочных машин и их производительностью. Печь собирают в стальном каркасе с самостоятельной

подвеской свода и стен газовой камеры, что позволяет производить ремонт бассейна и газовой камеры независимо друг от друга и в различные сроки. Расширение выпуска разных видов жароупорной стали и легированного чугуна позволило повысить температуру воздуха в рекуператорах компактной конструкции, используемых в печах, запроектированных для работы на мазуте или на природном газе.

Для теплотехнического контроля и стабилизации температур, состава и давления газов в печах и в связанных с ними регенераторах и рекуператорах используют современные аппараты, выпускаемые приборостроительной промышленностью. Усовершенствованные конструкции горелок в современных ванных печах обеспечивают форму и направление факела пламени, способствующих интенсивному топливному обмену газов с поверхностью стекломассы.

В настоящее время подавляющая часть стеклянных изделий формуется из стекла, сваренного в ванных печах.

Ванные печи непрерывного действия отличаются высокой производительностью, высоким качеством и стабильностью свойств стекломассы, однако вместе с тем имеют и ряд недостатков. Например, в них наблюдаются экстенсивные процессы дегазации и гомогенизации стекломассы, унос летучих компонентов с уходящими газами и другие недостатки, над устранением которых работают научно-исследовательские и конструкторские организации. Реализация на заводах достаточно проверенных предложений, например, использование электронагрева, применение механических перемещивающих устройств и других усовершенствований, иногда лимитируется либо высокой стоимостью электроэнергии, либо большой вязкостью и агрессивностью стекломассы. Большие успехи в производстве химически стойких огнеупорных материалов, жароупорных сплавов открывают дальнейшие перспективы усовершенствования ванных стекловаренных печей.

§ 2. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

На протяжении многовековой истории печной техники, начиная от примитивного горна и кончая современными высокопроизводительными печаами непрерывного действия, можно выделить несколько этапов совершенствования печей для производства керамических материалов и изделий. Первые «аппаратные» печи состояли из печного объема (без свода), ограниченного стенами, с примитивными бесколосниковыми топками для скжигания твердого топлива. В таких печах обжигали в основном тончарные изделия.

Следующим этапом является устройство камерных печей периодического действия с более совершенными топками и дымовыми трубами для регулирования отбора лымясовых газов в разные периоды обжига. Эти печи долгое время применяли для обжига разных видов керамических изделий и основным на твердом топливе.

В производстве хозяйственного фарфора в целях экономии топлива в течение длительного времени использовали круглые двух- и трехэтажные печи (горны). В камере первого этажа при температуре 1350–1400° С производили основной обжиг глазурованных изделий путем сжигания в топках твердого топлива дров, торфа, каменного угля. В камере второго этажа происходил предварительный обжиг (перед глазированием) изделий до температуры 900° С печными газами, выходящими из нижней камеры.

В XX в. быстрыми темпами росла потребность в силикатных изделиях. Чтобы удовлетворить эту потребность, надо было изобрести и усовершенствовать на заводах новые типы высокопроизводительных непрерывно действующих печей. В производстве строительного кирпича колыцевая печь непрерывного действия в Европе и России на многие годы стала основной тепловой установкой в этой отрасли. Эта печь имела весьма важные достоинства: малую металлоемкость, невысокую стоимость, возможность использования инокортых местных глин с узким интервалом температур спекания и низкокортного твердого топлива, непрерывную загрузку и разгрузку, использование отходящих дымовых газов и горячего воздуха для сушики кирпича и относительно высокий тепловой коэффициент полезного действия.

Однако колыцевые печи имеют и существенные недостатки, обусловленные перемещающимися лопатами подогрева, обжига и охлаждения и тяжелыми условиями ручного труда при загрузке кирпича в печной канал и выгрузке. Многочисленные попытки механизировать эти процессы, выполняемые при непрерывном перемещении фронта работ, не дали эффективных результатов.

В современных условиях колыцевые печи заменяют туннельными (СССР, Италия), а на некоторых заводах — механизированными наполненными печами коридорного типа на жидкое топливо или природном газе (США).

Высокотемпературный обжиг огнеупоров и кислотоупоров в камерных печах периодического действия отличается большим расходом топлива. Поэтому промежуточным этапом по широкому распространению туннельных печей были многокамерные печи, в которых печные газы и воздух для охлаждения изделий циркулировали по каналам между камерами по колыцевой схеме. При дефиците жидкого топлива или природного газа твердое топливо газифицировали в газогенераторах, которые сооружали в одном блоке с печью. Использование горячего воздуха охлаждаемых камер для сжигания низкокалорийного генераторного газа обеспечивало высокую температуру обжига, а колыцевая циркуляция топочных газов давала существенную экономию топлива.

Большая трудоемкость и тяжелые условия загрузки печных камер (как и в колыцевых печах) привели к замене многокамерных печей туннельными, где вагонетки загружают у прессов. Первые туннельные печи для обжига шамотных и динасовых огнеупоров были построены после Великой Октябрьской социалистической ре-

волюции у месторождений огнеупорных глин в Часовицком и Боронежском районах, и в этом направлении начала развиваться эта отрасль промышленности. В производстве тонкой керамики первые туннельные печи для обжига фаянса были построены по патенту Фужерона в 1911 г. на Тверской фабрике, ныне заводе им. М. И. Калинина, и на Будинской фабрике под Харьковом.

Хозяйственный фарфор и электроизоляторы обжигали в двухэтажных печах периодического действия. Туннельные печи начали строить в этой отрасли с развертыванием в первые пятилетки реконструкции заводов. Первые печи для обжига хозяйственного фарфора были построены на Хайтинском заводе под Иркутском и на Дудлевском под Москвой, а для обжига изоляторов — в Ленинграде и в Славянске.

Хозяйственный фарфор и малогабаритная техническая керамика разного назначения отличаются многообразием изделий, причем производство многих из этих изделий нередко связано с большими затратами труда. Механизация этих трудоемких процессов и дальнейший переход к осуществлению производственного процесса с помощью автоматических линий ведутся широким фронтом.

Тонкостенные чешуйки изделия можно высушивать и обжигать по специальному разработанному скоростным режимом на ленточных, роликовых или полочных конвейерах с одногруссной их загрузкой. Верхний температурный предел службы конвейеров с роликами из жароупорных сплавов — около 1100 С, а с керамическими роликами — 1250–1350 С. Включение в механизированные и автоматизированные линии конвейерных сушилок печей устраивают ручной труд при перемещении, загрузке, разгрузке и перстановке изделий на стыках между механическими и тепловыми процессами.

В массовом производстве керамических изделий простой формы, например облицовочных плиток, тарелок, конвейерные сушилки и печи получили широкое распространение.

§ 3. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Эволюция печей в производстве вяжущих материалов прошла столь же длинный путь, как и в производстве керамических изделий.

Технический уровень в производстве вяжущих материалов в XIX в. был обусловлен преобладанием малоактивных вяжущих материалов и их обжигом в шахтных печах периодического действия.

На первых цементных заводах, построенных в Германии в 1855 г., а также в России в 1865 г. (Рижский завод) и 1875 г. (Подольский завод), обрабатывали сырье (известняк и глину) по технологии, имеющей много общего с технологией, используемой в то время для производства строительного кирпича. Несколько сырьевую смесь формировали на ленточном прессе в виде кирпичей (валишек) высушивали на стеллажах под навесами в летний период, чем обуслов-

ливалась полусезонная работа заводов того времени. Зимой проводили зажигание обжига готовленных летом кирпичей, которые разбивали на куски и вручную загружали вместе с металлическим углем или коксом в шахтную печь периодического действия.

Приготовление сырьевых смесей, обслуживание стальной тяжелой естественной сушки, загрузку и разгрузку шахтных печей выполняли преимущественно в тяжелых и предных для здоровья условиях. В конце XIX в. в связи с увеличением потребности в цементе началась переход Глухоэзерского завода на круглогодовую работу с использованием искусственной сушки в канальных сушилках и обжигом в шахтных печах непрерывного действия.

Для обжига начали использовать шахтные печи непрерывного действия с ручной загрузкой топлива, распределяемого между кусками обжигаемого материала. В результате повысилось качество цемента по сравнению с качеством цемента, производившегося в шахтных печах периодического действия, но все еще сохранились неравномерность обжига клинкера и низкая производительность шахтных печей при резко возрастающем спросе на цемент. Использование горячего воздуха из зоны охлаждения для скижания топлива и слое материала и тепла продуктов его скижания на подогрев материала, поступающего в зону обжига, обеспечивает высокий тепловую к. п. д. этих печей. Поэтому усовершенствованные шахтные печи широко используют для обжига известняка, а также шамота, доломита и других материалов при соответствующей потребной производительности, однако по мощности они не могут конкурировать с вращающимися печами современных цементных заводов.

Первая вращающаяся печь для обжига цементного клинкера длиной 18 м и диаметром 1,8 м была построена в Англии в XIX в. Работа этой печи из-за несовершенной конструкции и малой производительности оказалась неэффективной. Примерно тех же размеров, но улучшенной конструкцией подобная печь была построена в США в 1890 г. и во Франции в 1897 г.

Первые вращающиеся печи в России были построены в 1906 г. в Волыске, затем и на других цементных заводах.

До Великой Октябрьской социалистической революции на цементных заводах России было установлено свыше 70 вращающихся печей разной производительности, изготовленных преимущественно зарубежными машиностроительными заводами. Отсутствие в до-революционной России заводов, специализированных на производстве оборудования для цементных заводов, было одной из причин эксплуатации заводов с устаревшим оборудованием. В 1917 г. на заводах было 215 шахтных печей с недостаточной механизацией смежных участков производства и большой затратой ручного труда. Мощность цементных заводов в России за период 1907–1917 гг. возросла в 3,5 раза, а мощность вращающихся печей, вытесняющих шахтные, за это время возросла в 18 раз.

С 1928 г. в ССР развернулось строительство вращающихся печей с увеличением их размеров до 150 м и ростом производительности

до 600 т сут. Динамика увеличения числа вращающихся печей в цементной промышленности и их суммарной мощности показана в табл. 1.

Таблица 1. Выпуск вращающихся печей по годам

| Номер строки | Данные по годам | | | |
|--|-----------------|------|------|------|
| | 1928 | 1930 | 1958 | 1978 |
| Число вращающихся печей | 55 | 123 | 913 | 386 |
| Суммарный выпуск вращающихся печей, т, в объеме общего выпуска цемента | 36 | 82,8 | 92,1 | 98 |

Обжиг цементного клинкера в шахтных печах к общему выпуску составил в 1958 г. 7,6%, а в 1978 г. — 2%.

ГЛАВА II. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ПЕЧАХ И СУШИЛКАХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Печами называют тепловые установки и сооружения, в которых путем нагревания исходного сырья или отформованных полуфабрикатов за счет организованно выделяемой тепловой энергии получают материалы или изделия с заданными свойствами.

В производстве силикатных материалов применяют печи для обжига шамота, кусковых и сыпучих материалов (преимущественно в производстве вяжущих материалов), керамических изделий и для варки стекла различного назначения.

Сушилками называют тепловые установки, используемые для удаления физически связанных влаги из сырьевых материалов или из отформованных полуфабрикатов.

Типичные тепловые установки, применяемые в технологии силикатных материалов, различают по следующим основным характеристикам: по циклу работы — периодическому или непрерывному, форме канала или камеры, в которых протекают физико-химические и тепловые процессы, циркуляции газов и условиям теплосмены с нагреваемым и охлаждаемым материалом.

§ 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ПЕЧАХ И СУШИЛКАХ

Разнообразные силикатные изделия получают в результате физико-химических процессов, протекающих при тепловой обработке между компонентами исходных материалов. По мере повышения температуры пироксины и керамической массы из них происходит

удаление влаги, разложение соединений с выделением химически связанной воды (дегидратация глин и каолинов) или углекислого газа (декарбонизация) и образование новых кристаллических фаз и силикатных расплавов, дающих в результате многостадийных процессов вложенные материалы, керамические изделия или стекло с заданными свойствами. Эти процессы в зависимости от состава шихты или керамической массы протекают при повышении температуры в разных сочетаниях и с разной скоростью.

Удаление воды, распределенной между зернами шихты или в микропорах крупных кусков и в отформованных изделиях, происходит в начале подъема температуры в печах или в специально оборудованных сушняках. При мокром способе производства цемента около 35% воды удаляется из шлама (сырьевой смеси) во вращающихся печах с большим расходом теплоты. Удаление воды из шлифов кера (жидкой керамической массы) для получения прессовочного порошка осуществляется при производстве плиток в распылительных сушняках до остаточной влажности 4–8%.

Сушка керамических изделий, отформованных отливкой или из пластичных керамических масс с влажностью 16–18%, протекает в сложных условиях и сопровождается сокращением размеров изделий (усадкой). Поэтому во избежание трещин и деформаций изделий их сушат по тепловым режимам, разработанным применительно к составам керамической массы, размерам и форме изделий.

В целях экономии топлива в туннельных сушняках используется горячий воздух, отбираемый из зоны охлаждения туннельных печей.

С подъемом температуры (выше 450° С) начинается разложение сырьевых компонентов с выделением паров воды и углекислого газа. Интенсивное разложение каолинов и чистых разновидностей каолинитовых глин происходит в интервале температур 500–500° С с выделением около 90% содержащейся в них гидратной воды. Полная дегидратация некоторых, например гидрослюдистых, глин завершается в интервале температур 700–900° С.

Эндотермические реакции разложения отмеченных компонентов исходного сырья и нагревание выделяющихся при этом углекислого газа и паров воды требуют значительных затрат тепла; особенно тепло требуется производство цемента, где известняк и глина — основное сырье.

Основные процессы варки стекла — разложение соды, известняка и других компонентов шихты, образование силикатов и расплавов, дегазация и гомогенизация стекломассы — протекают без четкого различия во времени. Шихта, используемая для варки стекла, обычно отличается высоким содержанием щелочей, которые вступают в реакцию с другими компонентами и образуют низкотемпературные расплавы, интенсифицирующие варку стекла.

Сложные процессы образования цементного клинкера и спекания керамических изделий протекают с образованием новых кристаллических фаз и сопровождаются выделением теплоты. Теоретиче-

ский расход теплоты на физико-химические процессы получения стекла, вяжущих материалов, керамических изделий является базисом при составлении тепловых балансов печей и определении теплового коэффициента полезного действия их работы. Действительное определение расхода теплоты на физико-химические процессы производится с учетом состава шихты или керамической массы, фазового состава выпускаемой продукции и конечной температуры плавки или обжига.

Для приближенных расчетов теплоты физико-химических процессов принимают усредненные показатели тепловых эффектов. Например, в производстве стекла принимают следующие приближенные показатели расхода теплоты в кДж/кг стекломассы:

| | |
|---|------|
| Испарение влаги шихты | 90 |
| Свободная теплота связывания компонентов шихты | 250 |
| Реакция стеклобразования | 460 |
| Нагрев газообразных продуктов дегазации стекломассы | 520 |
| Нагрев стекломассы от 20 до 1400° С | 1550 |
| Суммарный расход теплоты | 2870 |

Получение цементного клинкера завершается при температуре 1400–1450° С, причем оно сопровождается образованием новых кристаллических фаз, а также жидкой фазы, связывающей их в монолитные гранулы.

Суммарный тепловой эффект (тепературный расход теплоты на физико-химические процессы) обжига клинкера в зависимости от состава шлама колеблется в пределах 1650–1750 кДж/кг клинкера.

Свойства керамических изделий разнообразного назначения определяются составом используемых керамических масс (шихт) и режимом тепловой обработки (обжига) заформованных из них изделий. Термовой эффект обжига грубой строительной керамики, огнеупоров, технической и строительной керамики рассчитывают в зависимости от фазового его состава.

По протекающим физико-химическим процессам обжиг разделяют на два периода. В первом периоде в интервале температур 20–900° С удаляется физически связанные воды и разлагаются исходные материалы. Этот период обжига протекает в зонах подогрева непрерывно действующих печей. Во втором периоде в интервале от 900° С до конечной температуры обжига протекают сложные процессы синтеза новых кристаллических и жидких фаз и физические процессы, в результате которых в изделиях возникают высокая механическая прочность, огнестойкость и кислотоупорность, диэлектрические и другие необходимые свойства.

Комплекс этих процессов объединен одним названием «спекание» керамики. Различают три типа спекания керамических изделий:

- 1) спекание в твердых фазах;
- 2) спекание с участием жидкой фазы;
- 3) спекание, протекающее в начальной стадии между твердыми фазами, а затем вследствие образования легкоплавких эвтектических расплавов, заканчивающееся с участием жидкой фазы.

Спекание в гвердых фазах выполняется при использовании химически чистых исходных материалов, преимущественно в однокомпонентных или двухкомпонентных системах, когда при конечных температурах обжига не возникают эвтектические распады. Этот процесс отличается высокой стоимостью исходных материалов, высокой температурой обжига, дорогим и малопрочводительным оборудованием. Поэтому спекание в твердых фазах применяется при специфических требованиях к изготавливаемым изделиям.

Спекание с участием жидкой фазы протекает при взаимодействии кристаллических фаз с тонкозернистыми и равномерно распределенными легкоплавкими минеральными или синтезированными плавнем («спеком»). Образовавшаяся из циклической фазы снижает температуру и продолжительность спекания кристаллических фаз в молотильном материале. Спекание с участием жидкой фазы — основной генератор процесс в производстве строительной керамики, изоляционного и хозяйственного фарфора и других изделий. Содержание стекловидной фазы в изделиях, обжигавшихся с участием жидкой фазы, составляет от нескольких процентов до 30–40 %.

Третий тип спекания протекает с образованием на первой стадии обжига эвтектик на стеклах зерен основных кристаллических фаз и примесей, имеющихся в сырьевых материалах. Объем жидкой фазы с повышением температуры увеличивается за счет растворения мелких частиц кристаллической фазы.

В зависимости от состава керамической массы и сырья, требование обожженных изделий и разработавшему режиму обжига в нем могут преобладать элементы спекания второго или третьего типа, обеспечивающие минимальный удельный расход теплоты, небольшую продолжительность цикла термообработки и высокое качество продукции.

§ 5. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕЧЕЙ И СУШИЛОК

Классификация теплового оборудования по основным признакам должна дать общее представление о типах и конструкциях печей и сушилок, используемых на действующих заводах, а также разрабатываемых в институтах и конструкторских бюро для строящихся и реконструируемых заводов.

Расширение классификации путем краткой характеристики оборудования имеет целью определить область его применения на действующих заводах, а также возможность его использования или замены более современным на реконструируемых и на вновь строящихся заводах.

В разнообразных производствах силикатных материалов применяются разные типы печей и сушилок, различающиеся по назначению, конструкции, принципу действия отопительных систем, циркуляции газов и другим признакам. Это осложняет разработку единой общей классификации печей и сушилок.

Рассмотрим деление тепловых установок по основным признакам.

1. По характеру тепловой обработки тепловые установки разделяются на печи для обжига при температурах выше 500 °C, при таких температурах протекают сложные процессы получения разнообразной силикатной продукции, и на сушилки, работающие при низких температурах для удаления влаги, физически связанный с твердыми компонентами пыли, керамических масс, суспензий, порошкообразных и кусковых материалов.

2. По принципу действия тепловые установки могут быть непрерывно действующими и периодического действия.

3. По технологическому признаку — назначению тепловые установки могут быть разделены на следующие большие группы:

А. Печи для обжига кусковых и порошкообразных материалов, например в производстве цемента, извести и других вяжущих материалов, а также для обжига шамота, магнезита, доломита, глинозема в производстве огнеупоров.

Б. Печи для плавления шахты и получения стекломассы в производстве разных видов стекла и эмалей;

В. Печи для производства керамических изделий, например огнеупоров, хозяйственного фарфора, строительной керамики, электролизаторов и других видов технической керамики.

Каждая из трех групп печей отличается особенностями протекающих в них физико-химических процессов и требованиями, предъявляемыми к тепловой обработке шахты или полуфабрикатов;

Г. Сушилки для сушки кусковых и порошкообразных материалов и керамических изделий.

А. ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА КУСКОВЫХ И ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для обжига кусковых и порошкообразных материалов используют печи непрерывного и периодического действия. Печи непрерывного действия имеют большие преимущества по сравнению с печами периодического действия. Они отличаются меньшим удельным расходом топлива, требуют меньше затрат рабочей силы и потому вытеснили в многотонажных производствах печи периодического действия.

К печам непрерывного действия относят вращающиеся печи, шахтные печи, печи для обжига материалов в кипящем слое.

Вращающиеся агаты, применяемые для обжига цементного клинкера, шамота, магнезита, керамики, извести, гипса в то же подобных материалов, отличаются наивысшей производительностью, минимальными затратами рабочей силы на обслуживание при относительно высокой стоимости и малогабаритности оборудования.

Наибольшее распространение вращающиеся печи получили в производстве цемента. В зависимости от свойств сырья и других производственных условий вращающиеся печи размерами до 230 × 7 м работают по мокрому способу при обжиге цемента с влажностью 35–40 %, а печи размерами до 75 × 5 м (короткие) — по сухо-

му способу при низкой влажности порошкообразной сырьевой смеси.

Короткие вращающиеся печи, работающие по сухому способу, комбинируются с циклонными теплообменниками или конвейерными кальцинаторами. В таких печах, скомбинированных с конвейерными кальцинаторами, обжигают гранулы сырьевой смеси с влажностью 10—15%. Вращающиеся печи для обжига извести, а также сырья в производстве огнеупорных изделий обычно работают без теплообменных устройств.

Шахтные печи применяют для обжига извести, шамота, магнезита и других материалов, которые в зоне высоких температур не образуют спекающихся глыб и зависающих сводов, мешающих нормальному ходу обжига.

Шахтные печи отличаются низким удельным расходом топлива, небольшой металлоемкостью и небольшими капитальными вложениями на их содержание. Шахтные печи по сравнению с вращающимися печами имеют существенные недостатки: невысокую производительность, неравномерный обжиг по сечению шахты, больший удельный расход рабочей силы.

Печи для обжига материалов в килингющем слое или во взвешенном состоянии начиняют применять для обжига извести, мелкозернистого керамзита, перлита и тому подобных материалов. Режим обжига во взвешенном состоянии связан с диапазоном дисперсности обжигаемого материала, гидродинамикой газового потока и не обеспечивает равномерности обжига крупных и мелких частиц.

Печи периодического действия включают напольные, камерные, шахтные печи и котлы для варки гипса.

Напольные, камерные и шахтные печи периодического действия применяют для обжига извести и других материалов в небольшом по объему или сезонном производстве.

Котлы для варки (дегидратации) гипса из предварительно измельченного гипсового камня используют для получения материала с равномерной степенью дегидратации, используемого в автоматизированных линиях для производства листов сухой штукатурки (шитрока).

Б ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВЛЕНИЯ ШИХТЫ И ПОЛУЧЕНИЯ СТЕКЛОМАССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ РАЗНЫХ ВИДОВ СТЕКЛА И ЭМАЛЕЙ

Распространение получили непрерывно действующие печи и печи периодического действия.

К непрерывно действующим печам относят ванные и вращающиеся печи.

Ванные печи применяют для варки стекла разного состава и назначения и используют в производстве листового тарного стекла, сортовой посуды, архитектурного и технического стекла. Ванная печь состоит из бассейна, в котором плавится шихта и получается

гомогенная стекломасса для формования изделий, и газовой камеры для сжигания топлива. Ванные печи отличаются высокой производительностью и малыми затратами рабочей силы на обслуживание, но имеют низкий тепловой коэффициент полезного действия.

Вращающиеся печи применяют для плавки эмали, глазури и флюсов. Такие печи отличаются от вращающихся печей цементной промышленности небольшой длиной и более низкой производительностью.

К печам периодического действия относят горизонтальные, ванные печи периодического действия и барабанные печи:

горизонтальные печи предназначают для варки, в небольших количествах оптических, цветных, хрустальных и тому подобных специальных стекол,

ванные печи периодического действия используют для варки небольших количеств стекла при высоких температурах, а также глазурной фритты;

барабанные печи с периодической загрузкой и выгрузкой используют для плавления небольших количеств флюсов и эмалей.

В. ПЕЧИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Такие печи применяют для обжига изделий, обычно сопровождающегося изменением их размеров (усадкой). Особенность обжига, а также большой диапазон размеров изделий (от нескольких миллиметров до 2 м и выше) и предъявляемые к ним разнообразные требования — все это обусловило большое разнообразие типов и конструкций печей на керамических заводах.

Среди печей для производства керамических изделий получили распространение печи непрерывного и периодического действия.

К печам непрерывного действия относятся туннельные, конвейерные, колыцевые и многокамерные печи.

Туннельные печи в зависимости от размеров изделий, продолжительности и температуры их обжига различаются по размерам печного канала и конструкции зон подогрева, обжига и охлаждения. Длина печного канала (туннеля) колеблется в пределах от 3—5 до 160 м, в сечении — от 0,04 до 6 м². По способу нагрева туннельные печи могут быть разделены на печи с непосредственным (прямым) нагревом изделий искученными газами, муфельные с нагревом через тонкие перегородки в окислительной среде и на печи с электронагревом.

Печи с непосредственным нагревом изделий отличаются широкими возможностями регулирования режима обжига и производстве изделий разнообразного назначения, удобством обслуживания, долговечностью и надежностью в эксплуатации.

Муфельные туннельные печи применяются для обжига санитарной керамики, облицовочных плиток, майолики и других изделий, покрытых цветными глазурами, а также для закрепления керами-

ческих красок в окислительной среде. В этих печах изделия отделяются от печных газов огнеупорными карборундовыми и муллитовыми перегородками и нагреваются в основном за счет излучения последних.

В печах непосредственного нагрева муфельный обжиг иногда имитируют за счет загрузки изделий на ватогетки в закрытых шахматах или карборундовых конвейерах (капселях).

Туннельные печи с электронагревом предназначены для тех же условий, что и муфельные печи, но возможность их использования ограничивается высокой стоимостью электроэнергии по сравнению со стоимостью газообразного и жидкого топлива.

Конвейерные печи с сечатками, роликовыми и полочными конвейерами применяют для обжига малогабаритных тонкостенных изделий, в которых теплообмен, массообмен и связанные с ними диффузионные физико-химические процессы протекают быстро и позволяют резко сократить продолжительность обжига до технологически требуемого минимума.

Конвейеры работают при высоких температурах (800–1200 °С) и, как правило, с избыточной, обычно односторонней загрузкой в цепьевых каналах. Недостаточная вместимость таких каналов в производстве некоторых изделий, например глазурованных плиток, компенсируется возможностью снижения в несколько раз продолжительности их обжига. Конвейерные печи, как и туннельные, могут работать с непосредственным, муфельным и электрическим нагревом изделий.

В связи сокращения теплонеотдачи и лучшего использования теплоты конвейерные печи обладают не сколько кандидатов в одном блоке. Существенная экономия энергии при электробежке в многоканальных печах достигается применением встречных потоков полуфабрикатов.

Колыцевые печи с подвижной садкой и перемещающимися в замкнутом канале щипами подогрева, обжига и охлаждения применяют для обжига строительного кирпича, пустотелых блоков и черепицы на твердом топливе.

Топливо загружается через отверстия в своде и стгорает в саже кирпича. Колыцевые печи отличаются малой металлоемкостью и низкими капитальными затратами, работают с высоким генеральным коэффициентом полезного действия.

Загрузка и разгрузка колыцевых печей выполняется вручную в душной запыленной атмосфере. В настоящее время колыцевые печи заменяют туннельными, если используемое сырье обеспечивает устойчивость сажки кирпича на заготовках в виде обжига.

Многокамерные печи состоят из блокированных газоходами камер, работают на газообразном или жидком топливе и применяют для обжига огнеупоров и кислотоупоров. От печей периодического действия многокамерные отличаются использование газов, входящих из камер обжига в камеры подогрева изделий, а также горячего воздуха из камер охлаждения на сжигание топлива. При этом до-

стигается экономия топлива на 25–35% по сравнению с печами периодического действия. Расход топлива при обжиге малогабаритных огнеупоров (нормальный кирпич и легкие фасонные изделия) в многокамерных печах выше, чем в туннельных, примерно на 40–50%. Поэтому в массовом производстве с аналогичными режимами обжига используют туннельные печи, а многокамерные применяют для обжига разнообразных фасонных огнеупоров и кислотоупоров во специальном для отдельных камер режимах.

Неустойчивая сажка на ватогетках туннельных печей таких изделий, как канификационные и кислотоупорные трубы малых диаметров, вынуждает использовать в этих условиях многокамерные печи с неподвижной садкой.

К печам периодического действия относят: горны, напольные печи, однокамерные муфельные, высокотемпературные и лабораторные печи. Эти печи по расходу топлива, электроэнергии и рабочей силы, а также по условиям труда уступают печам непрерывного действия, заменяются последними при строительстве новых и реконструкции действующих заводов.

В настоящее время печи периодического действия применяют лишь при малом объеме производства часто меняющегося ассортимента изделий, при обжиге крупногабаритных изделий или при высокотемпературном обжиге изделий специального назначения.

Одно-, двух- и трехэтажные «горны» пока еще применяют для обжига фарфоровой посуды.

Напольные печи применяют для обжига глинняного кирпича с использованием механизированного транспорта для загрузки и выгрузки штабеля с большим объемом сажки.

Однокамерные печи с газовым и электрическим нагревом используют для обжига крупногабаритных изоляторов, керамических ванн и декорированных изделий большого размера.

Высокотемпературные электропечи с водяными и молибденовыми нагревательями применяют для обжига в защитной среде или вакууме малогабаритной технической керамики специального назначения.

Лабораторные печи предназначены для обжига в окислительной среде, имеют нагреватели из карбида или дисилицидомолибдена и используются в основном для проведения научно-исследовательских работ.

I. СУШИЛКИ

Для сушки кусковых, сыпучих материалов и суспензий используют барабанные, ленточные, пневматические и распылительные сушилки.

Барабанные и ленточные сушилки используют в цементной, стекольной и керамической технологии для сушки известняков, угля, глин, опок и других кусковых и сыпучих материалов.

Пневматические сушилки предназначены для сушки однородных гранулированных материалов в потоке горячего воздуха или топоч-

ных газов в течение нескольких секунд. Эти сушилки, как правило, комбинируют с помольным оборудованием и циклонами, предназначенными для обессыпывания отработанного теплоносителя.

Распылительные сушилки используются для приготовления пресс-порошка из шликера (жидкой керамической массы). В настоящее время распылительные сушилки получили широкое распространение в производстве облицовочных керамических плиток.

Для сушки керамических изделий используют сушилки периодического и непрерывного действия. К сушилкам периодического действия относят камерные, электроконтактные и высокочастотные сушилки.

В камерных сушилках изделия размещают внутри камеры на специально оборудованных полках. Теплопередача в этих сушилках осуществляется конвекцией, радиацией или комбинированно.

Электроконтактные сушилки работают за счет подачи электрической энергии непосредственно в высушиваемому изделию и применяются для сушки крупногабаритных отечественных изделий.

Высокочастотные сушилки представляют собой камеру, размещенную в поле индуктора. Высушиваемые изделия, помещенные в камере, нагреваются за счет индукционного поля. Эти сушилки используют для сушки дорогостоящих изделий сложной формы.

К сушилкам непрерывного действия относят туннельные и конвейерные сушилки.

В туннельных сушилках высушиваемые изделия перемещаются на вагонетках по обогреваемому каналу. Обогрев и сушка изделий в этих сушилках осуществляются, как правило, за счет конвективного потока теплоносителя. В качестве теплоносителя используют горячий воздух или топочные газы, смешанные с атмосферным воздухом для получения необходимой температуры.

В конвейерных сушилках изделия перемещаются на ленточных, сеточных, поддошных или роликовых конвейерах. Теплопередача в этих сушилках осуществляется за счет конвекции, радиации или комбинированно. Наибольшее распространение получили конвейерные сушилки, в которых конвективный теплообмен сочетается с радиационным. Для увеличения радиационной составляющей теплопередачи такие сушилки снабжают излучателями, обогреваемыми газом или электроизлучателями.

С целью экономии технологических площадей и повышения коэффициента полезного действия конвейерные сушилки часто делают многоярусными.

В объеме излагаемого курса нельзя рассмотреть все отмеченные в классификации типы и конструктивные варианты тепловых установок и охарактеризовать многообразие их применения в разных новых и охваченных производствах вакуумных материалов, стекла, отечественных, бытовой и технической керамики. Поэтому в дальнейшем изложениям будут рассматриваться наиболее распространенные печи и сушилки в тех конструктивных вариантах, которые получили преимущественное применение в том или ином производстве.

§ 6. СХЕМЫ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В производстве вакуумных материалов наибольшее распространение получили вращающиеся печи, шахтные печи и печи для обжига во взвешенном состоянии.

Вращающиеся печи, используемые для получения цементного клинкера (рис. 1, а) работают по мокрому или сухому способу производства и состоят из вращающегося барабана 5 с форсункой или горелкой для сжигания топлива, устройства для подачи шлама, холодильника для охлаждения клинкера и установки для очистки газов и пыли.

Печи, работающие по мокрому способу производства, имеют большие размеры (до 180 м и более) и снабжены внутренними теплообменными устройствами (фильтр-подогреватель, цепная запека и т. д.).

Печи, работающие по сухому способу производства (короткие печи), отличаются небольшой длиной (до 75 м) и комбинируются с внешними теплообменными устройствами — циклонами, шахтными теплообменниками или конвейерными кальцинаторами.

Независимо от способа производства во всех вращающихся печах в процессе теплообмена используют противоточное движение материалов и газов. Горячий воздух из холодильника подается в печь для сжигания топлива и может частично использоваться для сушки сырья.

Шахтные печи (рис. 1, б) применяют для обжига извести, цементного клинкера и других материалов. Для отопления шахтных печей используют твердое топливо, загружаемое в шахту вместе с обжигаемыми материалами или газообразное топливо, сжигаемое в отдельных топках. Обжигаемый в шахтных печах кусковой материал вместе с топливом подается в шахту через загрузочное устройство, проходит через зоны подогрева 1, обжига 2, охлаждения 3 и затем удаляется из печи разгрузочным устройством. Горячий воздух проходит из зоны охлаждения в зону обжига для сжигания твердого топлива, распределенного между кусками материала или гранул, сформированных из размолотой шихты.

В печах, оборудованных топками, горячий воздух из зоны охлаждения подается в зону обжига и зону подогрева через промежутки между кусками обжигаемого материала и используется для дожигания продуктов неполного сгорания топлива и нагрева обжигаемого материала.

Печи для обжига в кинескопе состоят из шахты, разделенной огнеупорными решетками 6 (рис. 1, в) на камеры подогрева 1, обжига 2 и охлаждения 3. Камеры соединены перепускными трубами, с помощью которых регулируются толщина слоя в отдельных камерах и соответствующий режим обжига и охлаждения. Жидкое топливо или газ сжигают в топочной камере с использованием форсунок или горелок. Горячий воздух, необходимый для горения топлива, подается вентилятором через топочную камеру и нижнюю решетку.

Преимущество этих недавно появившихся печей перед шахтными в том, что равномерное обжигание вследствие перемещивания кусков материала в кипящем слое.

В производстве керамических изделий наибольшее распространение получили туннельные, конвейерные, кольцевые, многокамерные печи непрерывного действия и камерные печи периодического действия.

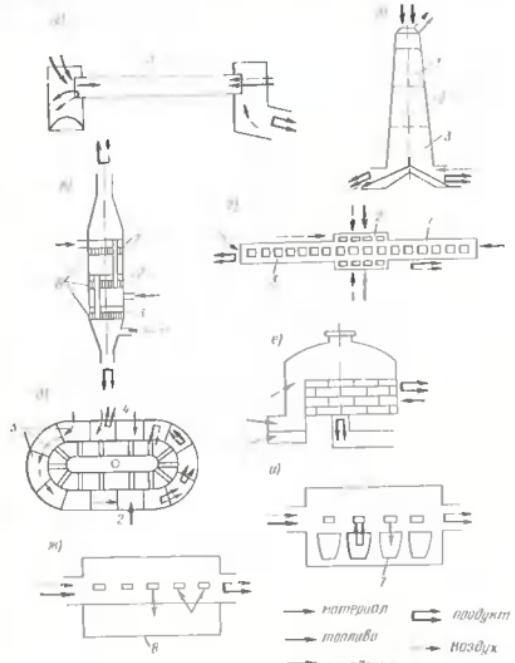


Рис. 1. Схемы основных печей синтезативной технологии

Туннельные печи имеют обычно прямой печной канал (рис. 1, а), через который на вагонетках подают изделия, последовательно нагреваемые в зонах подогрева 1 и обжига 2 и охлаждаемые в зоне охлаждения 3. Топливо сжигается в топках. Топочные газы проходят через зоны обжига и подогрева, а воздух подается через зону охлаждения к зоне обжига.

Таким образом обеспечивается эффективное противоточное нагревание и охлаждение изделий. Горячий воздух из зон охлаждения используется в зонах подогрева и обжига и в сушилках формовочных цехов.

Конвейерные печи, как и туннельные, имеют канал, через который изделия перемещаются специальными якорно-поршневыми, ленточными или полючными конвейерами. В зоне обжига печи оборудуют газовыми и реже мазутными тонкими или электронагревательными элементами, расположеными выше и ниже конвейера.

Топочные газы из зоны обжига проходят через зону подогрева и сушат изделия, подаваемые напротив конвейером. В зоне охлаждения изделия охлаждаются встречным потоком холодного воздуха. В конвейерных печах непосредственного нагрева и охлаждения организован интенсивный теплообмен по схеме противотока. В муфельных печах изделия нагреваются и охлаждаются излучением от нагнеупорных перегородок, отделяющих их от топочных газов.

Кольцевые печи отличаются от туннельных закрытым печным каналом (рис. 1, д), в котором процессы подогрева, обжига и охлаждения перемещаются по направлению движения печных газов через неподвижную садку строительного кирпича, блоков и изделий. Кроме трех зон теплопередачи в этих печах имеется также перемещающаяся зона загрузки сырья и разгрузки 4 обожженного кирпича.

В зоне обжига измельченное твердое топливо (раке газ) подается через канали в сплошной печи неочертенно в промежутки, оставленные в садке изделий для сжигания топлива. Горячий воздух, необходимый для процесса горения, поступает из зоны охлаждения. Газы из зоны обжига проходят через зону подогрева и через боров удаляются в атмосферу. Печной канал не имеет перегородок и условно разделен на камеры просмаки и наружной стены, через которые загружается и разгружается печь. Кольцевые печи могут работать в производстве грубой строительной керамики, обжигаемой обычно при температуре 1000–1100 °С с малым удельным расходом твердого топлива (обычно низкосортного) по из-за высокой традиционности процессов загрузки и выгрузки изделий заменяются при соответствующих предпосыпках туннельными печами.

Многокамерные газовые печи, как и кольцевые, работают с использованием тепла топочных газов и горячего воздуха в смежных камерах, обособленных промежуточными стенами с каналами и топочными устройствами. Многокамерные печи отличаются от кольцевых более равномерным обжигом и поэтому могут использовать для обжига небольших партий огнеупоров и кислотоупоров по частоте

меняющимся режимам. В массовых производствах многокамерные печи заменяются туннельными печами.

Камерная печь периодического действия состоит из круглой камеры, в стенах которой устроены топки (рис. 1, е) для сжигания твердого топлива, мазута или газа.

В печах периодического действия, применяемых в настоящее время, точечные газы подаются под свод камеры, а затем проходят инсходящим потоком через каналы между изделиями и удаляются через отверстия пода камеры и боров в атмосферу.

Эти печи отличаются высокими потерями теплоты с отходящими газами, поэтому в производстве фарфора с температурой обжига глазурованных изделий 1350–1400 °C применяют круглые двухэтажные печи «горны», в которых газы после обжига изделий в нижней камере подают по каналам в стенах в верхнюю камеру для предварительного (утепленного) обжига изделий при температуре 800–900 °C. Двухкратное использование печных газов в этих печах дало существенную экономию топлива. Переход этой печи с первого топлива на мазут позволяет улучшить регулирование режима обжига и условия обслуживания печи. Тяжелые условия затруднения, возникающие при переводе грузки печных камер и затруднения, возникающие при первом производстве на непрерывно поточном методе работы, привели к замене периодических печей туннельными. В настоящее время периодические печи применяют в производстве изделий разнообразного ассортимента по частоте меняющимся режимам обжига, например, круглогабаритных электропролиторов и кислотупорных изделий.

В производстве стекла наибольшее распространение получили ванные печи непрерывного и периодического действия, а также горизонтальные печи.

Ванные печи непрерывного действия получили преимущественное применение на современных заводах в результате их высокой производительности и возможности автоматизации регулирования тепловых процессов.

Основной конструктивный элемент ванных печей (рис. 1, ж): бассейн 6, разделенный на варочную и выработочную части. В варочной части бассейна производится варка стекломассы заданного состава, ее освещение и гомогенизация. В выработочной части бассейна за счет снижения температуры стекломасса приобретает оптимальную для данного состава стекла формовочную вязкость. Варка стекла и ее освещение происходит за счет передачи теплоты от прогревов сжигания топлива. Температуру стекломассы в выработочной части бассейна регулируют различными способами.

Для использования теплоты выхолаживания из печи точечных газов их подают в рекуператоры или рекуператоры для предварительного нагрева воздуха и газа. Нагрев газа и воздуха способствует повышению температуры горения газовоздушной смеси и повышению коэффициента полезного действия печи.

В настоящее время с целью улучшения качества стекломассы и повышения производительности ванных печей непрерывного дей-

ствия используют электроподогрев стекломассы в сочетании с газовым нагревом (пламенно-электрические печи) или применяют электрические печи.

Горизонтальные печи состоят из камеры (рис. 1, и), в которой установлены огнеупорные горшки 7 для варки стекла. Загрузку шихты в горшки и замену израсходованных горшков производят через окна, расположенные против каждого горшка в стенах печи.

В закладных щитах окон имеются отверстия для ручной или полуавтоматической выработки сваренного стекла. Печи обогревают преимущественно газом с устройством верхних или нижних горючих и выходом пламени через каналы в поду печи. Для подогрева воздуха и газа используют регенераторы или рекуператоры.

В настоящее время горизонтальные печи применяют для выработки цветных стекол, оптического стекла и другого подобного стекла в небольших объемах по частоте меняющимся режимам.

Ванные печи периодического действия, как и горизонтальные, работают по циклу: загрузка шихты, варка, освещение и гомогенизация стекла, выработка изделий, но отличаются большим сроком службы ванны, чем горшков, изготавливаемых по довольно сложной технологии. Эти печи используют преимущественно для варки высокотемпературных технических стекол в объемах, недостаточных для использования ванных печей непрерывного действия.

При использовании регенераторов или рекуператоров топки работают по схемам, принятым в ванных печах непрерывного действия. В периодических ванных печах, применяемых для плавления глазурной фарфора или эмали, расплав сливается из бассейнов в воду и таким образом гранулируется для последующего размола.

Печи для тепловой обработки изделий — отжига, закалки в массовом производстве включают вместе с оборудованием для формования изделий в автоматические линии. Основные элементы этих печей: прямой канал с роликовыми или ленточными конвейерами из жаропрочной тетки, газовые горелки или электронагреватели для регулирования режима тепловой обработки изделий по длине канала и приборы для автоматического регулирования режима.

ГЛАВА III. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ПЕЧАХ И СУШИЛКАХ СИЛИКАТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Тепловая обработка материалов в печах и сушилках силикатной технологии осуществляется в результате теплообменных процессов. Причем процессы взаимодействия между теплоносителем (пламенем, горячими газами или воздухом, или источником лучистой энергии и поверхностью нагрева) в своей совокупности составляют внешний теплообмен, а теплопередача внутрь нагреваемого тела — внутренний теплообмен. Как внешний, так и внутренний теплообмен происходит в результате конвекции, радиации и теплопро-

водности. Однако при внешнем теплообмене решающую роль играют радиация и конвекция, а при внутреннем — теплопроводность и конвекция.

Для работы печей и сушилок в технологии силикатных материалов характерным следует считать конвективный, радиационный и склоновый режимы внешнего теплообмена.

Под конвективным режимом работы понимают режим, в котором преобладает теплопередача соприкосновением, под радиационным — излучением. Склоновой режим рассматривается как самостоятельный в связи с тем, что при нагреве сыпучих материалов теплопередача конвекцией и лучепропусканием сопутствуют в широком температурном интервале и трудно разделены.

В свою очередь внутренний теплообмен характеризуется двумя режимами: кондуктивным и конвективным.

Кондуктивный режим характерен для твердых тел и жидкостей, находящихся в покое. Процесс нагревания твердого тела, находящегося в покое, может быть описан для одномерной задачи следующим уравнением:

$$\alpha \frac{\partial \Delta t_{\text{вн}}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{\text{вн}}, \quad (1)$$

где α — коэффициент внешней теплоподачи; λ — коэффициент теплопроводности, x — текущая координата в направлении теплового потока от поверхности к середине тела, $\Delta t_{\text{вн}}$ — разность температур между серединой и поверхностью нагрева тела, C_1 — температура тела, $^{\circ}\text{C}$, t — время, ч.

Совместное решение дифференциального уравнения теплопроводности с вышеприведенным уравнением при постоянной температуре среды позволяет получить зависимость

$$\frac{\Delta t_{\text{вн}}}{\Delta t_{\text{вн}}} = j(Bi), \quad (2)$$

где $\Delta t_{\text{вн}}$ — разность температур между поверхностью и серединой нагреваемого тела, $^{\circ}\text{C}$, $Bi = \alpha x_0 / \lambda$ — критерий Био; x_0 — половина тела в направлении теплового потока от поверхности до середины, ч.

При малых значениях критерия Bi ($Bi < 0,25$) тепло нагревается равномерно по толщине и внутренняя теплопередача не лимитируется процессом нагревания. Такие тела предложено называть «тонкими». При больших значениях Bi ($Bi > 0,5$) перенал температур внутри тела при его нагревании может быть значительным, и такие тела принято называть «массивными».

Процесс нагревания тонких тел лимитируется условиями внешнего теплообмена, процесс нагревания массивных тел — внутренней теплопередачей. При плавлении массивных тел интенсификация внешнего теплообмена ведет к ускорению процесса плавления и, следовательно, к уменьшению толщины и стесненности массивности. Поэтому процесс плавления лимитируется внешним теплообменом.

Конвективный режим внутреннего теплообмена характерен для нагрева расплавов, находящихся в движении, и нередко сочетается с поступлением теплоты от пламени в толщу расплава за счет радиации. Однако в условиях внутреннего теплообмена значение радиационной составляющейносит подчиненный характер.

Интенсификация теплопередачи конвекцией осуществляется либо в результате внешних воздействий (барботаж), либо путем нагревания, вызывающего естественную конвекцию. Нагрев жидкого тела происходит в условиях, аналогичных нагреву тонких и массивных тел.

Из изложенного следует, что если при нагреве тонких тел увеличение отношения поверхности тела к его массе ($F G$) играет основную роль с точки зрения интенсификации внешней теплопередачи, то при нагреве массивных тел увеличение $F G$ и связанные с ним уменьшение прогреваемой толщины играют главную роль с точки зрения интенсификации внутреннего теплообмена, вызванного уменьшением стесны массивности.

Вместе с тем для интенсификации нагрева массивных тел необходима соответствующая теплодотдача на поверхность нагреваемого тела. А эта теплодотдача определяется условиями внешнего теплообмена.

Таким образом, теплообменные процессы в печах и сушняках в основном определяются процессами внешнего теплообмена.

§ 7. КОНВЕКТИВНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ

Конвективный режим работы тепловых установок характеризуется преобладающим значением теплодотдачи конвекцией.

Область применения конвективного режима весьма ограничена. В основном этот режим как самостоятельный применяется в сушняках силикатной технологии, работающих при температуре не выше 100–300 $^{\circ}\text{C}$, в зонах подогрева и охлаждения туннельных печей для обжига керамики, в конвективных зонах и ходильниках вращающихся печей для обжига цементного клинкера.

Вместе с тем на практике наряду с радиационным теплообменом существенную роль играет теплопередача конвекцией в области рабочих температур 500–900 $^{\circ}\text{C}$, если теплонесущий имеет достаточно высокие скорости. При необычно больших скоростях движения теплонесителя конвекция теплопередачи может иметь заметное влияние на процесс теплообмена и при более высоких температурах.

Теплопередача конвекцией может быть выражена известной формулой Ньютона

$$Q = -k A U_{\infty} (T_{\infty} - T_w) F_w, \quad (3)$$

где T_{∞} — температура воздуха, установленная на основании принятого способа измерения, $^{\circ}\text{C}$; T_w — температура поверхности теплообмена, $^{\circ}\text{C}$; F_w — площадь теплообмена, м^2 ; k — коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{Вт} (\text{м}^2 \cdot {^{\circ}\text{C}})^{-1}$.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией представляет собой величину, зависящую от размеров и свойств пограничного слоя теплоносителя у поверхности нагреваемого тела, а последние определяются параметрами, относящимися к потоку теплоносителя и омываемой им поверхности

$$\alpha = f(\omega; l_b; \Delta t; \lambda; C_p; \rho; \mu; \Phi; \epsilon; b), \quad (4)$$

где ω ; C_p ; ρ ; μ — соответственно скорость, теплосмкость, плотность и абсолютная вязкость газа; Φ — характеристика формы поверхности нагрева; b — размеры поверхности нагрева

Учитывая сложность вышеприведенной зависимости, коэффициент теплоотдачи конвекцией для различных случаев находят экспериментально.

Используя теорию подобия, можно объединить отдельные величины, характеризующие свойства потока теплоносителя, в определенные комплексы.

Условия свободной конвекции характеризуются следующими уравнениями:

$$Nu = j_1(Gr; Pr), \quad (5)$$

где $Nu = \frac{\alpha b d}{\lambda}$ — критерий Нуссельта;

$Gr = \frac{g \beta \Delta t M}{\lambda^3}$ — критерий Грасгофа;

$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \rho c_p}{\lambda}$ — критерий Прандтля;

здесь $\nu = \frac{\mu g}{\gamma}$ — коэффициент кинематической вязкости, m^2/c ; g — ускорение силы тяжести, m/s^2 ; γ — удельный вес, N/m^3 ; β — коэффициент объемного расширения; d — характерный линейный размер потока, m ; c_p — коэффициент температуропроводности.

Условия вынужденной конвекции характеризуются уравнением

$$Nu = j_2(Re; Pr), \quad (6)$$

где $Re = \omega d / v$ — критерий Рейнольдса.

Из этого уравнения [5] следует, что в случае свободной конвекции интенсивность теплоотдачи определяют значением критерия Gr , т. е. двумя главными параметрами l и Δt , входящими в этот комплекс.

Разность температур Δt между теплоносителем и поверхностью нагрева, от которой зависит теплоотдача, создает скорость движения теплоносителя вдоль поверхности нагрева, а протяженность поверхности нагрева l — возможность развития движения.

В условиях вынужденной конвекции, как следует из уравнения (6), определяющим комплексом является критерий Рейнольдса, т. е. интенсивность теплоотдачи зависит от скорости движения потока относительно поверхности нагрева.

| Форма | Область сущест- вования | Значение критерия |
|--|--|---|
| плоскость  | $Gr \cdot Pr > 10^8 \cdot 10^9$ Ср-длиннодо- ление | $Nu > 1,8 \cdot \frac{Pr^{0,5}}{2,3 + Pr^{0,5}} \cdot Gr^{0,25}$ |
| | $Gr \cdot Pr < 10^8 \cdot 10^9$ Гидравлическое текущее | $Nu = 0,63 \cdot \left(\frac{Pr^{0,5}}{1 + Pr} \right)^{0,25} \cdot Gr^{0,25}$ |
| цилиндр  | $Gr \cdot Pr < 10^8 \cdot 10^9$ Компактное текущее | $Gr \cdot Pr > 10^8 \cdot 10^9$ Турбулентное текущее |
| | $\frac{L}{d} \leq 1$ | то же, что и для плоскости |
| плоскость  | $Gr \cdot Pr < 10^8 \cdot 10^9$ Gr · Pr · Re $< 10^{13}$ | $Nu = \sqrt{\frac{L}{b}} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$ |
| | $Gr \cdot Pr > 10^8 \cdot 10^9$ $Pr = 0,7$ | $1 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^2$ $6,4^2 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,7}{0,7+0,5} \cdot 0,001 = 0,001 \cdot 0,64 \cdot 10^3 = 6,4 \cdot 10^2$ $6,4^2 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,7}{0,7+0,5} \cdot 0,001 = 0,001 \cdot 0,64 \cdot 10^3 = 6,4 \cdot 10^2$ $Gr \cdot Pr \cdot Re = 10^{13}$ |
| цилиндр  | $Gr \cdot Pr < 10^8 \cdot 10^9$ $Pr = 0,7$ | $Nu = \sqrt{\frac{L}{d}} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}$ |
| шар  | $Gr \cdot Pr < 10^8 \cdot 10^9$ $Pr = 1$ | то же, что и для плоскости |

Рис. 2. Значения критерия Нуссельта и условия свободного конвекционного теплообмена для тел различных геометрических форм

Значения определяющих комплексов для ряда случаев как свободной, так и вынужденной конвекции в настоящее время численны и представлены на рис. 2 (свободная конвекция) и на рис. 3 (вынужденная конвекция).

§ 6. РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ

Радиационный режим работы печей предполагает осуществление вящего теплопереноса в основном посредством лучепропускания.

Существуют три разновидности радиационного режима работы печей, отличающиеся различным соотношением лучистых потоков от пламени на поверхность нагрева и кладку:

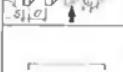
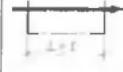
| Тип печи | | Область сушки бесконтактная | Задача сушки | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|---|---|-------|------|------|------|------|-------|-------|-----|------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|--------|-------|-------|-----|------|--------|-------|-------|-----|------|-------|-------|-------|-----|-------|--------|-------|-------|--|
| | | $Nu = \frac{L}{d} \cdot \frac{F_{Re}}{Pr} \cdot \frac{Re^n}{Pr^m}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Re</th> <th>n</th> <th>m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>—○—</td> <td>0.4</td> <td>0.989</td> <td>0.387</td> </tr> <tr> <td>—○—</td> <td>40</td> <td>0.911</td> <td>0.285</td> </tr> <tr> <td>—○—</td> <td>4000</td> <td>0.883</td> <td>0.666</td> </tr> <tr> <td>—○—</td> <td>40000</td> <td>0.865</td> <td>0.678</td> </tr> <tr> <td>—□—</td> <td>5000</td> <td>100</td> <td>0.106</td> <td>0.975</td> </tr> <tr> <td>—△—</td> <td>5000</td> <td>100000</td> <td>0.246</td> <td>0.988</td> </tr> <tr> <td>—○—</td> <td>5000</td> <td>100000</td> <td>0.153</td> <td>0.978</td> </tr> <tr> <td>—○—</td> <td>5000</td> <td>19500</td> <td>0.160</td> <td>0.985</td> </tr> <tr> <td>—○—</td> <td>19500</td> <td>100000</td> <td>0.195</td> <td>0.975</td> </tr> </tbody> </table> <p>Temperatura zonnitza $T_0 = 20$, $100^\circ C$ $\alpha = 0.795 \frac{T_0}{T_{max}}$</p> | | Re | n | m | —○— | 0.4 | 0.989 | 0.387 | —○— | 40 | 0.911 | 0.285 | —○— | 4000 | 0.883 | 0.666 | —○— | 40000 | 0.865 | 0.678 | —□— | 5000 | 100 | 0.106 | 0.975 | —△— | 5000 | 100000 | 0.246 | 0.988 | —○— | 5000 | 100000 | 0.153 | 0.978 | —○— | 5000 | 19500 | 0.160 | 0.985 | —○— | 19500 | 100000 | 0.195 | 0.975 | |
| | Re | n | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —○— | 0.4 | 0.989 | 0.387 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —○— | 40 | 0.911 | 0.285 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —○— | 4000 | 0.883 | 0.666 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —○— | 40000 | 0.865 | 0.678 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —□— | 5000 | 100 | 0.106 | 0.975 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —△— | 5000 | 100000 | 0.246 | 0.988 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —○— | 5000 | 100000 | 0.153 | 0.978 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —○— | 5000 | 19500 | 0.160 | 0.985 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| —○— | 19500 | 100000 | 0.195 | 0.975 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Угол наклона λ</th> <th>90°</th> <th>80°</th> <th>70°</th> <th>60°</th> <th>50°</th> <th>40°</th> <th>30°</th> <th>20°</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>длительное время</td> <td>1</td> <td>1.03</td> <td>1.05</td> <td>1.08</td> <td>1.15</td> <td>1.25</td> <td>1.45</td> <td>1.75</td> </tr> <tr> <td>70°</td> <td>1</td> <td>1.03</td> <td>1.05</td> <td>1.08</td> <td>1.15</td> <td>1.25</td> <td>1.45</td> <td>1.75</td> </tr> </tbody> </table> | Угол наклона λ | 90° | 80° | 70° | 60° | 50° | 40° | 30° | 20° | длительное время | 1 | 1.03 | 1.05 | 1.08 | 1.15 | 1.25 | 1.45 | 1.75 | 70° | 1 | 1.03 | 1.05 | 1.08 | 1.15 | 1.25 | 1.45 | 1.75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Угол наклона λ | 90° | 80° | 70° | 60° | 50° | 40° | 30° | 20° | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| длительное время | 1 | 1.03 | 1.05 | 1.08 | 1.15 | 1.25 | 1.45 | 1.75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70° | 1 | 1.03 | 1.05 | 1.08 | 1.15 | 1.25 | 1.45 | 1.75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | $Re < 2300$ Ламинарное течение $Nu = 1.64 \cdot Re^{0.5} \left(\frac{d}{L} \right)^{0.5} \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_s} \right)^{0.6}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | $Re = 2320 \dots 100 \cdot 100$ Трубчатое течение $Pr = 0.5 \cdot 500$ $d = g \cdot f$ ϵ | $Nu = 0.037 \left(Re^{0.75} \cdot Pr^{0.42} \left(\frac{\lambda_w}{\lambda_s} \right)^{0.6} \right) \left(1 + \left(\frac{d}{f} \right)^{0.67} \right)$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Рис. 8. Значения определяющих критерия и условий вынужденной конвекции (см. с. 30–38)

равномерно распределенный теплообмен,
 направленный прямой теплообмен;
 направленный косвенный теплообмен.

Равномерно распределенный теплообмен определяется равномерным полем температур и оптических констант пламени. В этих условиях падающие лучистые потоки от пламени на нагреваемый материал Q_o^u , на кладку печи Q_u^k равны, т. е. $Q_o^u = Q_u^k$.

Рассматриваемый режим работы печей наиболее целесообразен при нагреве массивных изделий и применяется во всех случаях.

| Форма тела | Область сушест- венностей | Значения критерия |
|--|---|---|
| плоское тело  | $Re > 200$ $d_s > 0.05 \text{ м}$ $L_s > 0.1 \text{ м}$ | $Nu = 0.037 \cdot Re^{0.75} \cdot Pr^{0.42}$ $\epsilon = 1000 \text{ КВт/м}^2 \text{ К}^4$ $\lambda = 0.033 \text{ Вт/м К}$ |
| Слойка  | $Re < 100$ | $Nu = 0.91 \cdot Re^{0.5}$ |
| шарик  | $Re < 100$ | $Nu = 0.43 \cdot Re^{0.5}$ |
| плоскость  | $Re < 10000 \dots 50000$ $Pr < 10 \dots 100$ | $Nu = 0.037 \cdot Re^{0.75} \cdot Pr^{0.42}$ |
| шарик  | $Re > 100000 \dots 500000$ | $Nu = 0.037 \cdot Re^{0.75} \cdot Pr^{0.42}$ |
| шарик  | $Re = 20 \dots 500000$ | $Nu = 0.037 \cdot Re^{0.75} \cdot Pr^{0.42}$ |
| шариковая насадка  | $Re = 1 \dots 1000$ | $Nu = 0.17 \cdot Re^{0.5}$ $Re < 100$ |

Когда нагреваемые изделия располагаются в печи в виде садки, причем так, что имеются поверхности нагрева, малодоступные для излучения от кладки. В качестве примера можно привести камерные, колыбельные печи, зону обжига туннельных печей высокотемпературного юга грубатых французских печей для обжига сыпучих материалов.

Все гентовые установки, работающие по принципу равномерно распределенного теплообмена, имеют относительно высокую температуру кладки T_g , значительно превышающую температуру нагре-



ваемого материала T_m и в идеале приближающуюся к температуре пламени T_u . Чем выше температура кладки, тем интенсивнее теплоотдача Лученспусканием. Если температура кладки в разных ее местах одинакова, то в противостоящие ей места поверхности нагрева при равномерной толщине пламени получают одно и то же количество теплоты.

С другой стороны, теплота, получаемая поверхностью нагревающего материала, зависит от степени черноты пламени ϵ_u и достигает максимума при $\epsilon_u = 1$.

Можно сделать вывод, что интенсификация теплообмена в условиях рассматриваемого режима работы печи определяется температурой пламени и степенью его черноты, причем, как следует из формулы

$$Q_u^{\text{мк}} = C \epsilon_u T_u^4, \quad (7)$$

влияние температуры более существенно. Однако практика показывает, что в области низких значений ϵ_u увеличение степени черноты пламени играет большую роль, чем в диапазоне высоких значений ϵ_u . Поэтому даже малое увеличение светимости практически несущественно газов играет большую роль.

Суммарное облучение того или иного элемента поверхности нагрева, следовательно, зависит от облучения его со стороны пламени и со стороны кладки. Идеальный теплообмен достигается в том случае, когда суммарное облучение каждого элемента поверхности нагрева одинаково. Так как обычно равномерное облучение со стороны кладки получить невозможно, то на практике равномерно распределенный режим работы достигается либо за счет интенсификации излучения пламени, либо варьированием интенсивности излучения пламени в зонах уравнивания суммарного лучистого потока. Последнее достигается утолщением слоя пламени в тех местах, где облучение со стороны кладки меньше.

При расчете нагрева массивных тел принимают следующий путь решения. На основании требований технологии выбирают режим изменения температуры поверхности и центра изделия в процессе нагрева и время нагрева изделия. Процесс нагрева разбивают на ряд интервалов, для каждого из которых определяют величину теплопоглощения. Для каждого интервала нагрева усредняют температуру поверхности нагрева. По величине теплопоглощения и усредненной температуре поверхности нагрева находят необходимые параметры внешнего теплообмена (эффективную температуру и степень черноты пламени). По полученной эффективной температуре и степени черноты пламени выбирают топливо и определяют параметры процесса сжигания.

Таким образом предлагаемый теоретический расчет основан на подборе параметров внешнего теплообмена исходя из условий внутренней теплонередачи.

Направленный радиационный теплообмен создается в печи, если падающий лучистый поток от пламени на материал больше, чем на кладку, т. е. $Q_u^{\text{n}} > Q_h^{\text{n}}$. Сущность рассматриваемого теплообмена заключается в получении возможно большего значения разности $Q_u^{\text{n}} - Q_h^{\text{n}} = \Delta Q_u^{\text{мк}}$ за счет создания градиента температур по толщине пламени. В результате поверхность, прилегающая к зоне высоких температур, получает большие тепла, чем противоположная, так как слои пламени с меньшей температурой задерживают излучение горячих слоев и экранируют кладку.

Направленный радиационный теплообмен имеет очень широкое распространение и применим для нагрева как тонких, так массивных изделий. Отличительная особенность направленного теплообмена состоит в возможности его регулирования и интенсификации в широких пределах за счет изменения расположения факела. В силикатной технологии этот вид теплообмена получил наибольшее распространение в стекловаренных печах.

Основным средством повышения интенсивности теплонередачи при прямом теплообмене является повышение максимальной температуры пламени. В этом случае результатирующий тепловой поток на поверхности нагрева зависит от средней степени черноты пламени и возрастает по мере ее увеличения. Наибольшее значение имеет степень черноты слоев пламени с максимальной температурой.

Детальный анализ рассматриваемого вопроса в общем виде затруднителен, однако можно рекомендовать следующую схему приложения расчета направленного радиационного теплообмена:

а) разделение рабочего пространства печи на несколько радиационно взаимодействующих зон, в каждой из которых температуру и другие параметры лучистого теплообмена принимают постоянными. Температуры в отдельных зонах выбирают исходя из практическých соображений;

б) определение результатирующих тепловых потоков для поверхности нагрева q_u на основании расчетов внутренней теплонередачи, КДж м^{-2} .

Для выяснения необходимой характеристики отдельных зон плавления следует воспользоваться уравнением

$$\frac{\epsilon_m F_m 4,9 \cdot 10^{-4}}{(1 - \rho_m \varphi_{km}) (1 - \rho_m \varphi_{km})} [(\varphi_{km} - \varphi_m \varphi_{km}^*) Q_{km} + (\varphi_{km} + \varphi_m \varphi_{km}^*) Q_{km}^*] = (\varphi_{km} - \varphi_m \varphi_{km}^*) Q_{km} - \varphi_{km}^* Q_m \quad (8)$$

В индексах 1, 2, ..., n — обозначены зоны плавления, φ — угловые коэффициенты,

$$\begin{aligned}\varphi_{km} &= \frac{\varphi_{km}}{1 - \varphi_{km}}, \quad \varphi_{km}^* = \frac{\varphi_{km}}{1 - \varphi_{km}^*}, \\ Q_{km} &= T_1^k - T_2^k, \quad Q_{km}^* = T_2^k - T_3^k \\ Q_{km} &= T_3^k - T_M^k, \quad \rho — коэффициент изотермии\end{aligned}$$

Если плавление раздelenо на n зон, то в вышеуприведенном уравнении будут n неизвестных, а именно T_1, T_2, \dots, T_n .

Задаваясь результатирующими тепловыми потоками для соответствующих зон и записав для этих потоков вышеуприведенное уравнение, можно найти неизвестные температуры. При этом необходимо помнить, что алгебраическая сумма результатирующих тепловых потоков для всех зон, включая и граничные, должна быть равна нулю, т. е. $Q_1 - Q_2 - Q_3 - \dots - Q_n = 0$.

Направленный косвенный теплообмен. Такой теплообмен создается в печах при условии, если падающий тепловой поток от изделия на кладку печи больше теплового потока, падающего на поверхность нагрева, т. е. $Q'_n < Q'_m$.

В отличие от прямого радиационного теплообмена косвенный теплообмен характеризуется тем, что область максимальных температур расположена ближе к поверхности кладки, чем к поверхности нагрева. Чем больше Q'_n , тем ближе температура кладки к температуре плавления и тем больше радиация кладки. Интенсивность теплового потока от плавления на кладку зависит от степени черноты плавления и его толщины.

В печах рассматриваемого теплообмена в чистом исполнении встречается редко в связи с высокой температурой обжига материалов и необходимости поддерживания температуры кладки и области предельной температурой службы кладки.

Однако большое распространение, в основном в производстве керамических изделий, получило несколько иной способ разогрева плавляющей поверхности — за счет поверхностного скижания топлива. В этом случае смесь горючего с воздухом в виде очень тонкого слоя направляется на нагретую керамическую поверхность.

Характерной стороной поверхностного горения является быстрота теплообмена между горячим слоем горящего газа и керамической поверхностью.

С точки зрения процессов теплообмена при поверхностном скижании топлива следует выделить в печах две зоны. Первая простирается сбоку зоны теплообмена вблизи керамической поверхности,

причем тонкий слой практически не участвует в теплообмене с нагреваемым материалом. Вторая — это зона теплообмена между раскаленной керамикой, поверхностью нагрева и остальными элементами печи при наличии дучепоглощающей среды. Чем чешнее степень черноты газов, заполняющих печь, тем эффективнее работа печи.

Расчет теплообмена между раскаленной излучающей поверхностью и поверхностью нагрева сводится к случаю теплообмена между двумя поверхностями, образующими замкнутую систему. Распределение температур в замкнутой системе может быть найдено из уравнения

$$T = \frac{1}{1 - 0,5 [T_k (1 - \beta) - T_m (1 - \beta (H - x))]} \quad (9)$$

где H — расстояние от кладки до поверхности нагрева, x — текущая координата по высоте от заложки кирзы, β — коэффициент поглощения газового слоя

Суммарный коэффициент теплопередачи в этом случае равен:

$$\sigma_T = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_m} + \frac{F_m}{F_m} + \frac{1}{\sigma_n} + \frac{1}{\sigma_f}} \quad (10)$$

Косвенный теплообмен часто организуют путем замены кладки холодными поверхностями с высоким коэффициентом отражения. Печи подобной конструкции получили название рефлекторных печей. На указанных принципах работают большинство вакуумных печей, предназначенных для высокотемпературных обжигов.

Особо организуется теплообмен в так называемых мuffleевых и полумuffleевых печах, работа которых основана на теплопередаче через стенку муфты. Эти печи как теплообменное устройство более сложны, так как тепло приступает в рабочее пространство печи не только в результате сжигания топлива, но и через кладку. Для рабочего пространства этих печей справедливо выражение

$$\dot{q}_m = \dot{q}_u - \dot{q}_f$$

ГЛАВА IV. ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В ПЕЧАХ И СУШИЛКАХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

§ 9. ВИДЫ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВ

Процессы теплообмена в тепловых установках по производству силикатных изделий неразрывно связаны с процессами движения газов, являющимися теплоносителями. Управление процессом движения газов в тепловых агрегатах дает возможность регулировать процессы переноса теплоты, добиваясь наиболее экономичной и высокопроизводительной работы таких агрегатов.

В тепловых установках различают естественное и принудительное движение газов. Естественное движение газов происходит в результате геометрического напора, возникающего вследствие разницы между плотностью газа и плотностью окружающей среды или разницы между плотностью газа в различных точках рабочего пространства установки

$$P_{\text{геом}} = H (\gamma_b - \gamma_f) \quad (11)$$

где $P_{\text{геом}}$ — геометрический напор, Н м²; H — расстояние от центра тяжести сечения до нулевого уровня, м; γ_b — плотность воздуха, Н м³; γ_f — плотность газа, Н м³.

Геометрический напор столба газа с удельным весом γ_f выражается уравнением

$$H_{\text{геом}} = P_{\text{геом}} / \gamma_f \quad (12)$$

Если температура газа по высоте столба изменяется от T_1 до T_2 , то геометрический напор вычисляют при средней температуре, т. е. $T_{\text{ср}} = \frac{1}{2} (T_1 + T_2)$.

Если существует разность давлений газа, заключенного в технологический объем, и окружающей атмосфера, то газ обладает статическим напором

$$H_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} / \gamma_f \quad (13)$$

где $P_{\text{ст}}$ — статическое давление, измеряемое манометром в заданном сечении.

Кинетическая энергия движущегося газа выражается динамическим или скоростным напором и определяется уравнением

$$H_{\text{дин}} = w_f^2 / 2g \quad (14)$$

где w_f — действительная скорость газа, м/с; g — ускорение силы тяжести, м²/с².

Связь между напорами при движении газов в двух различных сечениях (1) и (2) устанавливается уравнением Бернулли, которое для идеального газа имеет следующий вид:

$$H_{\text{геом}} + H_{\text{ст1}} + H_{\text{дин1}} = H_{\text{геом}} + H_{\text{ст2}} + H_{\text{дин2}} = \text{const} \quad (15)$$

Если имеет место установленвшееся движение газов, то через любое сечение в единицу времени проходит равное количество газа, определяемое из уравнения

$$F_1 w_1 \gamma_1 = F_2 w_2 \gamma_2 = \text{const}, \quad (16)$$

где F_1 и F_2 — площади сечений, м²; w_1 и w_2 — средние скорости газа в сечениях F_1 и F_2 , м/с; γ_1 и γ_2 — средние плотности газов в сечениях F_1 и F_2 , Н м³.

Приведенное выше уравнение получило название уравнения непрерывности струй.

Принудительное движение газов возникает под действием сил, приложенных извне.

В реальных условиях, как правило, не наблюдают в чистом виде естественное или принудительное движение газов. В большинстве

случаев движение газов вызывается совокупностью сил, возникающих в газовой среде и вне ее. При этом газы на своем пути встречают сопротивления.

Различают местные сопротивления h_m , сопротивления от трения h_{tr} и сопротивления, связанные с преодолением геометрического напора h_g , который может как препятствовать, так и способствовать движению газа.

Местное сопротивление, Н м², характеризуется коэффициентом сопротивления при скоростном напоре

$$h_m = a \frac{w}{2g} \quad (17)$$

где a — коэффициент местного сопротивления.

Сопротивление от трения, Н м², зависит от шероховатости стен трубопроводов или печных каналов. Причем в случае ламинарного потока шероховатость стен не влияет на движение газов

$$h_{tr} = b \frac{w^2 L \gamma}{2gd_0} \quad (18)$$

где w — действительная скорость движения газа, м/с; L — длина канала, м; γ — ускорение силы тяжести, м²/с²; d_0 — эквивалентный диаметр канала, м; b — коэффициент трения.

Для ламинарного движения $b = 61$ Рс.

Для турбулентного движения b можно принять равной для кирпичных каналов 0,05, для металлических слабо окраинных 0,035, 0,04.

§ 10. ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ГАЗОВ

В процессе работы тепловых установок в их технологических объемах всегда наблюдается движение газов, называемое циркуляцией. Если циркуляция газов осуществляется в результате из естественного движения, то такая циркуляция называется внутренней. В большинстве случаев внутренняя циркуляция приводит к температурному расслоению газовых потоков, которое препятствует равномерность процесса тепловой обработки.

Внешняя циркуляция газов, или рециркуляция, проходит вследствие принудительного движения газов. При рециркуляции в рабочую камеру тепловых установок подаются газы, отбираемые и смешиваемые с другими газами вне камеры, чтобы создать равномерное температурное поле заданного уровня и обеспечить полное использование теплоносителя, полученные от скания тоннеля.

Отработанные газы из рабочей камеры целиком образно отводятся в нижней части печи, так как в этом случае отводят наиболее низкозадымленные газы. При отводе газов через свод они являются менее использованными. Кроме того, нижняя часть печи может оставаться не заполненной пылью. Газы необходимо подводить на уровне отвода, так как в этом случае в значительной мере выравнивается температура по высоте камеры.

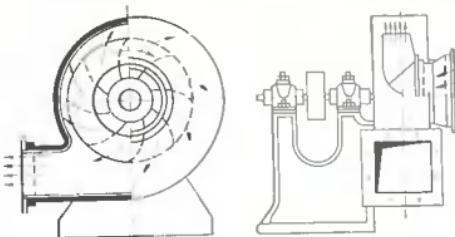


Рис. 4. Центробежный вентилятор

В настоящее время принудительное движение газов и рециркуляция являются одни из важнейших средств управления процессами горения тоцита и теплообмена в печах.

§ 11. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГАЗОВ

Газы поступают в печь как результат естественной тяги или с помощью искусственно отсылающих и нагнетающих приспособлений. Отходящие газы отводят также с помощью естественной тяги (фымовая труба) или принудительно (вентиляторы, экекторы). Часто в печах используют и естественную тягу, принудительный подвод и отвод газов. Напр., создаваемый приспособлениями для перемещения газов, рассчитывают исходя из сопротивлений на пути газа.

Искусственную тягу осуществляют вентиляторы, которые, в отличие от дымовой трубы, могут создавать как разрежение, так и давление.

Давление, создаваемое вентиляторами, может достигать 1000 Н/м² и выше. Различают вентиляторы низкого давления (до 1000 Н/м²), среднего (1000–3000 Н/м²) и высокого давления (3000 Н/м²).

По принципу действия вентиляторы могут быть осевыми и центробежными.

Действие, создаваемое центробежными вентиляторами, состоит из статического и динамического давлений. Между частотой прращения центробежного вентилятора, его производительностью, давлением и мощностью электродвигателя существует определенная зависимость. Производительность вентилятора (количество подаваемого воздуха) возрастает пропорционально увеличению частоты его прращения. Создаваемое вентилятором давление пропорционально квадрату частоты его прращения, а потребляемая мощность — частоте его прращения, введенной в куб.

На рис. 4 приведена схема центробежного вентилятора, состоящего из кожуха в форме улитки, внутри которого вращается колесо с лопатками.

Вентиляторы удобно подбирать по характеристическим кривым, выражющим связь между основными параметрами работы вентилятора. Полная характеристика вентилятора при его постоянной частоте вращения выражает зависимость между его производительностью

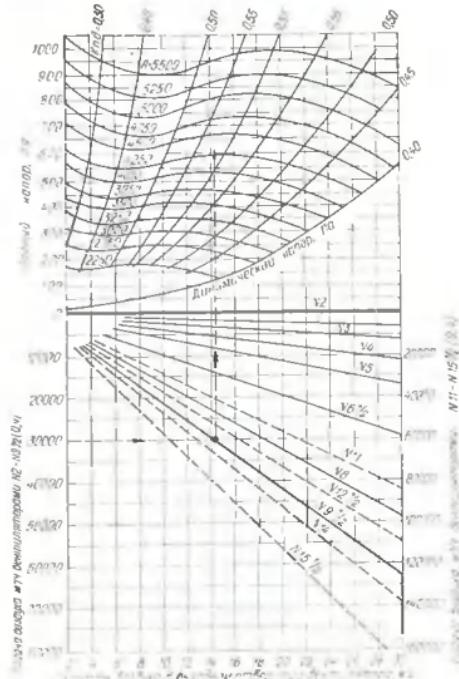


Рис. 5. Номограмма для подбора величин ширин и высоты изображения

нестью Q , давлением P , мощностью N и коэффициентом полезного действия η .

На рис. 5 приведена номограмма вентиляторов низкого давления, а на рис. 6 — вентиляторов среднего давления.

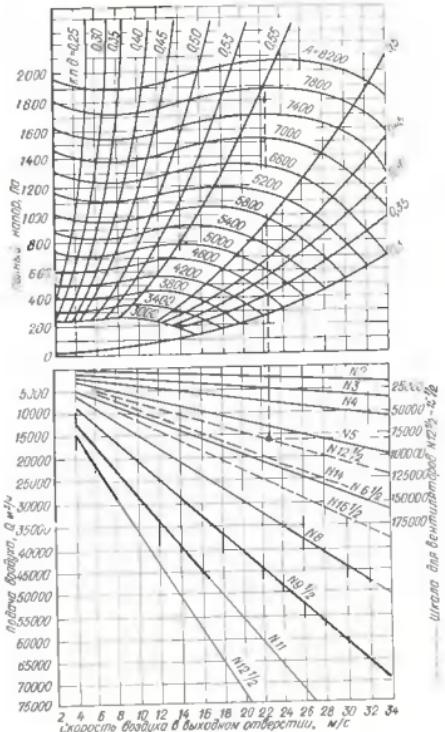


Рис. 6 Номограмма для подбора вентиляторов среднего давления

В нижней части номограммы по оси ординат показаны производительности вентиляторов в $\text{м}^3/\text{ч}$, по которым подбирают номер вентилятора. В верхней части номограммы по оси ординат отложены суммарные давления вентиляторов; кривые, идущие от начала координат сверху, обозначают коэффициент полезного действия вентилятора при различной его производительности.

Крайняя кривая справа выражает значение динамического давления для разной частоты вращения вентилятора. Частоту вращения вентилятора определяют по кривым, идущим слева направо в горизонтальном направлении. Верхняя кривая соответствует наибольшей частоте вращения вентилятора, допустимой по соображениям прочности. Частоту вращения вентилятора получают делением числа A , показанного на кривых, на номер вентилятора.

ГЛАВА V. ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ В ПЕЧАХ И СУШИЛКАХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

§ 12. ВИДЫ И СВОЙСТВА ТОПЛИВА

ОБЩИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВА

Промышленное топливо по назначению разделяют на энергетическое и технологическое.

Топливо, сжигаемое в теплоэнергетических установках с целью получения энергии, называют энергетическим.

Технологическим топливом считают топливо, сжигаемое в заводских печах, топках сушилок и других установках для использования тепла в технологических процессах производства.

Выбор технологического топлива для какого-либо производства определяется особенностями его технологии и, главным образом, конструкцией установок.

Из всех требований, предъявляемых к такому топливу, общими являются следующие:

при сгорании топливо должно выделять значительное количество теплоты на единицу своей массы или объема и не должно выделять вредных газов, загрязняющих окружающую атмосферу и действующих на конструкционные материалы печей и печей;

топливо должно быть дешевым и обладать способностью выдерживать длительное хранение без существенного изменения своих свойств.

По физическому состоянию различают топливо твердое, жидкое и газообразное.

По происхождению топливо делят на естественное и искусственное, причем последнее получают в результате технологической переработки естественного топлива.

Топливо состоит из горючей и негорючей частей. К горючей части топлива относят углерод С, водород Н, кислород О, азот N и серу S. Так как кислород и азот не горят, то включение их в состав горючей массы является условным. Горючая часть топлива поэтому называется условно горючей массой. Негорючая часть топлива, называемая балластом, состоит из влаги W и золы L. Органическую массу топлива составляют углерод, водород, кислород и сера.

Топливо в том виде, в котором оно поступает в топки и в печи для сжигания, носит название рабочего топлива.

Органическая масса топливаает представление о топливе без примеси золы, серы и влаги и помогает выяснить характер его происхождения.

Условно горючая масса характеризует горючую часть топлива.

Состав сухого топлива, высущенного до его постоянной массы, является характеристикий топлива.

Состав рабочего топлива позволяет получить наиболее исчерпывающую характеристику топлива. Во всех теплотехнических расчетах используют рабочее топливо.

Для обозначения состава, к которому относится содержание этого или иного элемента в топливе, применяют индексы о, г, с и р. Например: С — обозначает содержание углерода в органической массе; S — серы в условно горючей массе; Аг — ямы в сухом топливе; Wр — влага в рабочем топливе.

Количественное содержание отдельных составных частей топлива выражают в процентах, отнесенных к его массе.

Зная состав органической массы и содержание балласта в рабочем топливе, можно выразить состав рабочего топлива в процентах, пользуясь следующими формулами для пересчета:

$$C^p = C^o \frac{100 - B}{100} \quad (19)$$

$$H^p = H^o \frac{100 - B}{100} \quad (20)$$

$$O^p = O^o \frac{100 - B}{100} \quad (21)$$

$$N^p = N^o \frac{100 - B}{100} \quad (22)$$

где $B = \% A_g + \% W_p$.

С помощью аналогичных формул можно пересчитать состав топлива с условно горючей массой на сухое топливо, с сухого топлива на рабочее и т. д.

Газообразное топливо представляет собой смесь различных газо- и негорючих газов. В его состав могут входить следующие газы:

горючие — окись углерода CO, водород H₂, метан CH₄, этилен C₂H₄, этан C₃H₈, бутан C₄H₁₀; сероводород H₂S и др.

негорючие — азот N₂ и углекислый газ CO₂.

В отличие от твердого и жидкого топлива состав газообразного топлива выражается в процентах по объему, а не по массе.

Все виды топлива характеризуются удельной теплотой горения¹, под которой понимают количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы или объема топлива. При этом удельную теплоту горения твердого и жидкого топлива относят к 1 кг, а газообразного топлива — к 1 м³.

Для одного и того же вида топлива удельная теплота горения может колебаться в широких пределах в зависимости от влажности, зольности и других свойств топлива.

Удельная теплота горения может быть отнесена к органической, горячей или рабочей массе топлива, ввиду чего к букве Н добавляют соответствующий индекс: о, г, с, р.

Образующаяся при горении топлива влага может учитываться в продуктах горения в виде жидкости или пара, в связи с чем различают два предела удельной теплоты горения топлива.

Если влага учитывается в виде жидкости, то получается верхний предел; при учете влаги в продуктах горения в виде пара получается нижний предел удельной теплоты горения, так как при превращение воды в пар, требующий затраты теплоты, снижает удельную теплоту горения топлива. Между верхним и нижним пределами удельной теплоты горения, обозначаемыми соответственно через Н_в и Н_н, существует следующая зависимость:

$$H_n = H_v - 600 \frac{9H + W}{100} \quad (23)$$

В теплотехнических расчетах обычно применяют Н_в, так как в условиях обычного сжигания топлива влага уносится из топок в виде водяного пара.

Удельная теплота горения топлива может быть определена экспериментально — путем сжигания небольшого количества топлива и пересчета выделенного количества теплоты на 1 кг или на 1 м³ данного топлива, а также вычислением на основании химического состава.

Наиболее распространенные формулы для определения удельной теплоты горения топлива по его химическому составу имеют следующий вид:

$$H = \frac{q_C C + q_H H - q_S S}{100} \quad (24)$$

где Н — удельная теплота горения топлива, кДж/кг; q_C, q_H, q_S — теплота горения соответственно 1 кг углерода, водорода и серы, кДж, с учетом эмпирических поправок в связи с тем, что в свободное состояние этих элементов в топливе: С, H и S — содержание этих элементов в топливе, %.

¹ Удельная теплота горения топлива обозначается буквой Н и имеет разницу кДж/кг или кДж/м³.

Ввиду того что форма химических связей между отдельными элементами в составе разных видов топлива неодинакова, эти формулы можно применять только для определения удельной теплоты сгорания тех видов топлива, к которым они относятся.

Для определения удельной теплоты сгорания твердого и жидкого топлива наилучше часто применяют формулу Д. И. Менделеева

$$H = 81C - 300H - 26(O - S). \quad (25)$$

Коэффициенты 81, 300 и 26, стоящие перед C, H и S, выражают значения теплоты сгорания соответствующих элементов, денные на 100. Коэффициент 26, стоящий перед O, представляет собой так называемый кислородный потенциал, т. е. число, учитывающее, насколько уменьшает удельную теплоту сгорания каждый процент содержащегося в топливе кислорода, находящегося в связанном состоянии с горючими элементами топлива.

Для верхнего предела удельной теплоты сгорания формула Д. И. Менделеева имеет вид

$$H_B = 81C - 300H - 26(O - S), \quad (26)$$

для нижнего предела удельной теплоты сгорания

$$H_B = 81C + 300H - 26(O - S) - 6(9H - W). \quad (27)$$

Удельная теплота сгорания газообразного топлива равна сумме теплоты горения отдельных его составных частей, умноженных на соответствующее их количество:

$$H_B = \frac{3620 CO + 2580 H_2 + 8550 CH_4 + 14100 C_6H_6 + 5520 H_2S}{100}. \quad (28)$$

где CO, H₂, CH₄, C₆H₆ и H₂S — процентное содержание соответствующих горючих газов в газообразном топливе.

Для удобства сравнения отдельных видов топлива введено понятие об условном топливе.

Условным называют топливо, при полном сжигании которого выделяется 29 308 кДж/кг для твердого и жидкого топлива или 29 308 кДж/м³ для газообразного топлива.

Отношение удельной теплоты сгорания какого-либо натурально-го топлива к условному топливу носит название калорийного эквивалента.

ВИДЫ ТОПЛИВА

Газообразное топливо. Оно имеет следующие отличительные особенности: не содержит золы и не загрязняет золой обжигаемый материал; легко скапливается и хорошо смешивается с воздухом; легко транспортируется.

По происхождению газообразное топливо делится на естественное (природный газ) и искусственное (генераторный, доменный, коксовый и другие горючие газы).

Природный газ представляет собой высококалорийное топливо. Он состоит в основном из метана (CH₄), содержание которого достигает 90% и выше. Удельная теплота сгорания природного газа составляет 31 400—37 700 кДж/м³.

Из всех видов искусственного газообразного топлива наибольшее значение имеет генераторный газ. Процесс получения генераторного газа из твердого топлива называется газификацией топлива. Сущность процесса газификации состоит в исключении сжигания кускового топлива при недостатке воздуха. Помимо газификации в газогенераторах превращение угля в горючий газ возможно в угольных пластах, залагающих в недрах земли. Средний состав газа при подземной газификации угля (в %): CO₂ — 8; CO — 18; CH₄ — 4; H₂ — 18; N₂ — 52. Удельная теплота сгорания 5860 кДж/м³.

Доменный, коксовый и другие искусственные горючие газы имеют значительно меньшее значение. Удельная теплота сгорания доменного газа 3350—4190 кДж/м³; коксового газа ~ 18 000 кДж/м³.

Жидкое топливо. Основными видами жидкого промышленного топлива являются продукты переработки нефти. Нефть представляет собой смесь нарафиновых (C_nH_{2n+2}) и ароматических (C_nH_{2n-6}) углеводородов, которые могут находиться в различных соотношениях.

Зольность и влажность нефтяного топлива интенсивно мальят, так как нефть и продукты ее переработки не растворяют минеральные вещества и не смешиваются с водой. Сернистые примеси содержатся в нефти также в малых количествах. Удельная теплота сгорания нефти около 40 000 кДж/кг.

Сырая нефть представляет собой ценные сырье для получения нефтепродуктов, используемых в различных областях народного хозяйства. Нефтяные остатки, остающиеся после извлечения из нефти различных продуктов, называются мазутом. Его используют как промышленное топливо.

По внешнему виду мазут представляет собой черно-бурую жидкость с зеленоватым оттенком. В зависимости от содержания предельных и непредельных углеводородов мазут делится на парaffинистый и непарaffинистый.

Элементарный химический состав мазута и его удельная теплота сгорания близки к такому же составу и удельной теплоте сгорания сырой нефти.

В отличие от прочих видов топлива мазут характеризуется вязкостью, температурой вспышки паров и температурой застывания. Температура застывания мазута имеет большое значение при эксплуатации мазутопроводов. Известно, что застывший мазут нельзя транспортировать по трубопроводам и наполнять им цистерны и резервуары. Температура застывания мазута тем выше, чем больше в нем нарафиновых углеводородов.

В последние времена освоено получение искусственного топлива из каменных углей путем гидрирования их и непосредственного синтеза так называемого синтеза из водяного генераторного газа.

Применение тоцлина, полученного из нефти, для печей по производству силиката и настолько же времени ограничивается. В недалеком будущем все стоящие сейчас нефтязные тоцлины печи подлежат переводу на пластинчатое или газообразное тоцливо.

Твердое тоцливо. К твердым тоцливам относят ископаемые угли, горючие сланцы, точечные шлаки и торфы. Ископаемые угли — плавленные виды промышленного тоцлина. Среди ископаемых углей выделяют бурый уголь, каменные угли и антрациты.

Характерная особенность бурого угля — различия между удельной теплотой горения горючей массы и удельной теплотой горения рабочего тоцлина вследствие высокого содержания балласта. По содержанию углерода они уступают каменным углям, но превосходят торф.

Бурые угли различных месторождений СССР имеют много общих свойств, причем все они характеризуются высоким содержанием балласта (шлака, щели, а иногда и серы), большим количеством летучих (свыше 40%), склонностью к самоподгоранию при продолжительном хранении на складе.

Каменные угли по своему составу и свойствам имеют широкий интервал колебаний. В связи с этой общей классификацией, охватывающей все каменные угли, не существует

Антрациты представляют собой ископаемые угли с наибольшим содержанием углерода. От каменных углей они отличаются большей плотностью и блестящей темно-серой или черной поверхностью.

Антрациты горят коротким пламенем, выделяя при горении мало летучих; они не коксуются, их уძельная теплота горения в рабочем состоянии близка к показателю условного тоцлина (~ 29 818 кДж/кг).

Горючие сланцы образовались путем прокатывания глинистых, мергелистиковых и известниковых и других горных пород продуктами разложения некоторых видов органических веществ.

Сланцы — многогодильное тоцливо; в них содержится 40—60% золы. Содержание летучих в сланцах достигает 70% и выше.

Удельная теплота горения горючей массы сланцев 27 230—33 520 кДж/кг, но удельная теплота горения рабочего тоцлина вследствие высокого содержания золы 6285—8380 кДж/кг. По применению горючие сланцы считаются местным тоцливом.

К местному тоцливу относят также коксенный шлак, паровозную пыль и другие тоцливые отходы, содержащие много несточечного углерода. Содержание горючего вещества в шлаке составляет 40%, а теплота горения — 8480—16 760 кДж/кг.

Среди местных гверных видов тоцлива следует отдельно выделить торф. Но занятие торфа Советским Союзом занимает первое место в мире. Торф представляет собой продукт разложения различных растительных остатков в влажных условиях без доступа воздуха.

Состав органической массы торфа зависит от степени его разложения: чем сильнее разложение, тем больше содержится в торфе

углерода и меньше кислорода. Балласт торфа характеризуется значительной влажностью (25—35%). Зольность торфа невелика и в большинстве случаев составляет 5—10%. Удельная теплота горения торфа в рабочем состоянии 10 475—14 600 кДж/кг.

Пылевидное тоцливо. — главнейший вид тоцлива в цементной промышленности. Пылевидное тоцливо получают путем помола ископаемых углей или горючих сланцев.

Сжигание тоцлива в виде пыли имеет следующие преимущества перед сжиганием его в виде кусков: быстрое и полное горение вследствие хорошего перемешивания пылевидного тоцлива с воздухом; высокая температура горения благодаря малому избытку воздуха, обеспечивающему полноту горения; удобство обдувания топок и печей вследствие легкости регулирования процесса горения; возможность наиболее эффективного использования низкосортных видов тоцлива.

Тонкость помола зависит от содержания горючих летучих веществ и золы в тоцлине; тоцливо с небольшим содержанием летучих должно подвергаться более тонкому помолу.

Процесс приготовления угольной пыли состоит из дробления, сушки и помола углов. На заводах применяют две системы приготовления угольной пыли: центральную и индивидуальную.

При центральной системе угольную пыль приготавливают для всех печей в одном месте и затем подают к отдельным печам.

Индивидуальная система предусматривает установку углеразмольных мельниц непосредственно у каждой печи. Индивидуальные установки приготовления пыли могут работать с замкнутым или разомкнутым циклом. Установка с замкнутым циклом эффективно применяется для помола углей с влажностью не выше 10—15%. Для углей с влажностью более 15% следует отдавать предпочтение установкам с разомкнутым циклом.

В настоящее время на вновь строящихся заводах преимущественно предусматриваются индивидуальные размольные установки, в которых совмещены размол и сушка углей в мельнице.

§ 13. ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ТОЦЛИВА

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТОЦЛИВА

Горение тоцлива представляет собой окисление горючих элементов тоцлива кислородом воздуха. Большинство реакций горения тоцлива экзотермические.

Подвергаясь нагреванию, тоцливо при 105—110 °C теряет свою влагу. При температуре примерно 150—180 °C начинается разложение тоцлива на летучие вещества и твердый остаток — кокс. При дальнейшем нагревании тоцливо воспламеняется и начинается горение. Как правило, чем больше летучих горючих веществ выделяется при разложении тоцлива от нагревания, тем ниже температура его воспламенения.

Взаимодействие между горючими элементами топлива и кислородом воздуха начинается гораздо раньше воспламенения, но процесс окисления идет с незначительной скоростью и то количество теплоты, которое создалось, недостаточно для поддержания окисления без подвода тепла извне. С повышением температуры от внешнего источника теплоты скорость реакции окисления увеличивается и с некоторого момента возрастает настолько, что процесс горения протекает уже без внешнего источника теплоты. Этот момент называется воспламенением топлива, а температура, при которой происходит воспламенение — температурой воспламенения.

Большую роль в процессах горения играет скорость реакций, которая тем выше, чем выше температура и концентрация горючих элементов и кислорода, участвующих в процессе горения.

Для протекания реакций окисления в процессе горения необходимо непрерывный подвод воздуха к горящему топливу. При невысоких температурах продолжительность химических реакций значительно больше времени, необходимого для подвода кислорода к горючим элементам топлива. Полное время горения в данном случае определяется в основном кинетикой химических реакций.

С повышением температуры скорость реакций горения резко возрастает и полное время горения определяется уже физическими факторами: временем, необходимым для интенсивного смешивания горючих элементов топлива с кислородом воздуха; временем, необходимым для подвода кислорода к поверхности топлива и отвода ее образовавшихся продуктов горения.

Скорость горения в низкотемпературной кинетической области быстро возрастает с повышением температуры, но не зависит от скорости подвода воздуха. В высокотемпературной диффузионной области скорость горения зависит не только от температуры, но и от скорости подвода воздуха. Влияние температуры в диффузионной области горения скальвается с мгновением, чем в кинетической.

При дальнейшем повышении температуры влияние ее начинает скавливаться на протекание восстановительных реакций.

Реакции горения топлива являются обратимыми:



Если прямая реакция протекает с выделением тепла, то обратная — с поглощением его.

При обычных условиях горения топлива в печах (1000—1500 °C) степень протекания обратных реакций исключительно велика и в расчетах не учитывается. При более высоких температурах необходимо учитывать эндотермический эффект обратных реакций.

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

При теоретических расчетах определяют расход воздуха для горения топлива, состав газообразных продуктов горения и температуру, развиваемую при горении топлива.

При определении расхода воздуха, необходимого для горения топлива, принимают следующий состав воздуха (в %):

| | По объему | По массе |
|----------|-----------|----------|
| Кислород | 23 | 21 |
| Азот | 77 | 79 |

Количество воздуха (кг кг топлива), необходимое для горения, определяется с помощью общих уравнений реакций горения, из которых может быть получена формула

$$L_t = (2,67C + 8H - O) 0,23 \cdot 100, \quad (29)$$

где C, H, S и O — содержание соответствующих элементов в топливе, %.

Коэффициенты перед C, H и S представляют собой количество кислорода, необходимого для сгорания 1 кг этих элементов.

Количество воздуха, подсчитанного по уравнениям химических реакций, называют теоретическим количеством воздуха.

Подставив в уравнение (29) значение плотности воздуха, получим формулу для определения теоретического количества воздуха по объему (m^3 кг топлива):

$$V_t = (2,67C + 8H - O) 0,23 \cdot 100 \cdot 1,293. \quad (30)$$

Формулы (29) и (30), если в них произвести арифметические действия, примут вид:

$$L_t = 0,115C + 0,345H - 0,043(S - O) \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (31)$$

$$V_t = 0,089C + 0,267H - 0,033(S - O) \text{ м}^3/\text{кг} \quad (32)$$

Теоретическое количество воздуха представляет собой минимум, необходимый для полного окисления горючих компонентов топлива. В действительности при сжигании топлива вводится большее количество воздуха, чем предполагается теоретически.

Для каждого вида топлива практически установлено необходимый расход воздуха, который носит название практической, или действительной, количества воздуха L_d .

Разность $L_d - L_t$ называется избытком воздуха и выражается в процентах по отношению к L_t .

Отношение L_d к L_t называется коэффициентом избытка воздуха (табл. 2):

$$\alpha = \frac{L_d}{L_t} \dots \quad (33)$$

откуда действительное количество воздуха

$$L_d = \alpha L_t \quad (34)$$

Избыток воздуха оказывает огромное влияние на процесс горения топлива. Увеличение избытка воздуха нелиноно только до тех пор, пока не наступит полное горение топлива. Дальнейшее увеличение будет приводить к снижению температуры горения и возрастанию объема дымовых газов, на который тратится выделяемая при горении теплота.

Таблица 2. Избыток и коэффициент избытка воздуха при сжигании разных видов топлива

| Топливо | Избыток воздуха, % | Коэффициент избытка воздуха | Формула | Избыток воздуха, % | Коэффициент избытка воздуха |
|----------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------------|
| Твердое кусковое Пылеватое | 30—100 20—25 | 1,3—2 1,2—1,25 | Жидкое Газообразное | 15—25 5—20 | 1,15—1,25 1,05—1,2 |

При контроле процесса горения в работающих установках коэффициент избытка воздуха определяют по составу продуктов горения

$$\alpha = 21 [21 - 79 (\text{O}_2/\text{N}_2)]. \quad (35)$$

где O_2 и N_2 — содержание кислорода и азота в продуктах горения.

Формула (35) пригодна для определения коэффициента избытка воздуха в случае горения твердого и жидкого топлива.

При неполном горении топлива в дымовых газах находится окись углерода CO , а иногда водород H_2 и чистый CH_4 . В этом случае коэффициент избытка воздуха определяют по следующим уравнениям:

$$\alpha = 21 \left[21 - 9\text{O}_2 - \frac{(\text{CO} \cdot 2)}{\text{N}_2} \right], \quad (36)$$

или

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \left[\frac{\text{O}_2 - [\text{CO} + \text{H}_2] \cdot 2] - 2\text{CH}_4}{\text{N}_2} \right]} \quad (37)$$

При определении состава продуктов горения учитывают, что в состав продуктов горения топлива входят следующие газы: углекислый газ, пары воды, серный ангидрид, азот и кислород (CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 и O_2).

Продукты горения топлива при недостатке воздуха будут содержать дополнительно окись углерода CO , иногда водород H_2 и метан CH_4 , не окисленные кислородом воздуха.

Зная состав топлива и расход воздуха для его горения, можно рассчитать состав продуктов горения, применив уравнения основных реакций горения.

Правильность расчетов проверяют, используя закон сохранения массы веществ до реакции и после нее. Применив этот закон к процессу горения, можно считать, что масса топлива и воздуха равна массе газообразных продуктов горения и золы:

$$G_t + G_a = G (\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2) \quad (38)$$

Указанное уравнение выражает материальный баланс процесса горения, который обычно приводят в виде табл. 3.

Таблица 3. Материальный баланс процесса горения 100 кг каменного угля

| Наименование статей расхода | Приход | | Наименование статей расхода | Расход | |
|------------------------------------|-------------|------------|---------------------------------|---------------|------------|
| | кг | % | | кг | % |
| Топливо — каменный уголь | 100 | 6,2 | Продукты горения — дымовые газы | 1623,6 | 99,6 |
| Воздух, израсходованный на горение | 1530 | 93,8 | Зола топлива | 7 | 0,4 |
| Итого | 1630 | 100 | Итого | 1630,6 | 100 |

Материальный баланс служит основой для составления тепловых балансов.

При расчете температур горения топлива в теплотехнике используют следующие понятия температур горения: калориметрическая максимальная, калориметрическая, теоретическая, практическая.

Калориметрической максимальной температурой горения топлива называют такую температуру, которую приобретают продукты полного сгорания топлива при теоретически необходимом количестве воздуха и при условии, что все тепло, выделенное топливом, израсходовано лишь на нагрев продуктов горения.

Калориметрической температурой горения топлива называют такую температуру, которую приобретают продукты горения топлива при полном сгорании и при любом коэффициенте избытка воздуха, большем единицы.

Теоретическая температура горения топлива отличается от калориметрической тем, что при ее определении следует учитывать влияние эндотермических реакций диссоциации двуокиси углерода (CO_2) и воды (H_2O) в продуктах горения.

Все три вышеупомянутые понятия температуры горения относятся к адиабатным условиям.

В реальных условиях теоретическая температура не может быть достигнута, так как часть тепла, выделяемого при горении, расходуется на нагревание окружающей среды. Достигаемую практическими при горении топлива температуру называют практической температурой горения топлива.

Отношение практической температуры горения к теоретической носит название пиromетрического коэффициента горения. Обычно его принимают равными 0,6—0,8.

Теоретическая температура горения может быть вычислена исходя из теплового баланса процесса горения в адиабатных условиях.

Тепловой баланс процесса горения 1 кг топлива может быть выражен следующим уравнением:

$$H_{\text{п}}^{\text{p}} = C_{\text{в.г}} V_{\text{п.г}} t_x, \quad (39)$$

где $H_{\text{п}}^{\text{p}}$ — удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг или кДж/ м^3 ; $C_{\text{в.г}}$ — объем теплосодержимость продуктов сгорания топлива кДж ($\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$); $V_{\text{п.г}}$ — объем продуктов сгорания топлива, м^3 ; t_x — теоретическая температура, $^\circ\text{C}$.

Решая это уравнение относительно t_x , имеем

$$t_x = H_{\text{п}}^{\text{p}} / C_{\text{в.г}} V_{\text{п.г}}. \quad (40)$$

Для решения этого уравнения, как правило, применяют способ подбора значений с последующей интерполяцией аналитическим или графическим путем. Прямое решение затруднено, так как температура газов находится в функциональной зависимости от искомой температуры.

Температура горения может быть значительно повышена путем подогрева воздуха, а в случаях сжигания газообразного топлива — и газа. При подогреве воздуха и газообразного топлива формула для определения теоретической температуры горения будет иметь следующий вид:

$$t_x = \frac{H_{\text{п}}^{\text{p}} + C_{\text{в.г}} V_{\text{п.г}} t_{\text{в}} - C_{\text{г}} V_{\text{г}} t_{\text{г}}}{C_{\text{в.г}} V_{\text{п.г}}}, \quad (41)$$

где $H_{\text{п}}^{\text{p}}$ — удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг или кДж/ м^3 ; $V_{\text{в}}$ — объем воздуха, израсходованного на горение, м^3 ; $C_{\text{в}}$ — теплосодержимость воздуха, кДж ($\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$); $t_{\text{в}}$ — температура подогрева воздуха, $^\circ\text{C}$; $V_{\text{г}}$ — объем газообразного топлива, м^3 ; $C_{\text{г}}$ — теплосодержимость газообразного топлива, кДж ($\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$); $t_{\text{г}}$ — температура подогрева газообразного топлива, $^\circ\text{C}$; $V_{\text{п.г}}$ — объем продуктов сгорания топлива, м^3 ; $C_{\text{в.г}}$ — теплоемкость продуктов сгорания топлива, кДж ($\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$).

§ 14. УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

ТОПКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Твердое топливо сжигают в специально предназначенных для этого топках или непосредственно в рабочем пространстве печи. Различают простые и полугазовые топки. На рис. 7, а приведена схема простой топки. Как показала практика, подобные топочные устройства работают удовлетворительно лишь при тщательной загрузке и шуровке, выполняемых вручную.

Большее распространение получили полумеханические и механические топки. На рис. 7, б показана схема полумеханической топки с шурующей планкой. Колосниковая решетка этой топки состоит из плит с отверстиями диаметром 6 мм для подачи воздуха. Шуровочная планка совершает возвратно-поступательные движения по колосниковой решетке; несколько коротких — для подачи и продвижения топлива и затем одно — во всю длину колосников для шуровки и сбрасывания шлака в бункер. Планка передвигается

автоматически. Существуют и другие конструктивные решения механизации процессов загрузки топлива и его шуровки на колосниковой решетке, например, вариант с наклонно-переваливающими колосниками (рис. 7, б).

В топочных устройствах с неподвижной колосниковой решеткой сжигают древесину, торф и угли, за исключением смекающихся и тоящих углей.

В механизированных топочных устройствах сжигают торф, бурые и каменные угли.

В полугазовых топках горение тончайших газов происходит в рабочем пространстве печи. В этих топках используются с большой количеством легучих: торф и длинноцветущие угли. Во-первых, необходимый для процесса горения, подают в два приема: первый раз воздух подают под колосниковой решеткой с целью выдувания пылегаза, второй раз — в первую часть топочной установки или рабочее пространство печи. Как правило, чем больше толщина слоя топлива, находящегося на колосниковой решетке, тем более образуется продуктов неочистого сгорания. Для различных видов топлива предельная толщина слоя, находящегося на колосниковой решетке, различна и составляет для торфа 1 м, бурых углей 0,5—0,8 м, каменного угля 0,4—0,5 м, для антрацита 0,1 м.

Температура в полугазовых топках ниже, чем в топках полного сгорания, и лежит в пределах 700—1000 $^\circ\text{C}$. Удельная теплота сгорания пылегаза невысока — 2500—4000 кДж/ м^3 ; его состав по компонентам колеблется в следующих пределах: CO_2 10—15%, CO 7—20%; H_2 5—12%; N_2 50—60%.

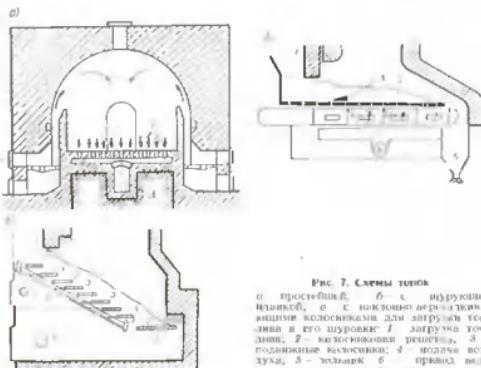


Рис. 7. Схемы топок:
а) простая топка с шурующей планкой;
б) полумеханическая топка с наклонно-переваливающими колосниками.

ФОРСУНКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Основной метод сжигания жидкого топлива — распыление с помощью форсунок. Перед процессом сжигания жидкое топливо в виде вязкой смеси, например мастиг, предварительно подогревают с целью снижения его вязкости.

Процесс сжигания жидкого топлива состоит из следующих стадий: распыление жидкого топлива до тонкоисперсенного состояния, испарения, т. е. превращения жидкого топлива в паровую fazу, смешивания парообразных горючих элементов с воздухом, воспламенения и горения газифицированной горючей смеси.

Типы форсунок различаются по способу распыления топлива: а) за счет энергии распыливающей струи; б) сжатием распыляемого топлива.

К первому типу относят форсунки низкого и высокого давления.

В форсунках низкого давления, одна из конструкций которых показана на рис. 8, а, топливо распыляется холодным или немного подогретым воздухом, подаваемым обычно в две ступени. Скорость воздуха на выходе составляет 50—75 м/с, давление мазута — 0,147—0,245 МПа. В этих форсунках предусмотрена возможность подогрева вторичного воздуха в различных теплообменных устройствах.

В форсунках высокого давления распыливающей средой является пар или воздух. Давление воздуха у выходного отверстия составляет 0,196 МПа. Расход пара на распыление составляет 0,6—0,8 кг/кг, а его давление — 0,3—1,2 МПа. Давление воздуха 0,196—0,78 МПа.

Схема одного из многочисленных типов форсунок высокого давления приведена на рис. 8, б. Отличительной конструктивной особенностью вышеназванной форсунки является то, что внутренняя мазутная трубка и окружающая ее внешняя воздушная труба образуют расширяющееся сошло, в котором статическое давление распыливающей среды практически полностью преобразуется в скоростной напор. В результате достигаются большие скорости истечения, и мазутная струя подвергается сильному дроблению.

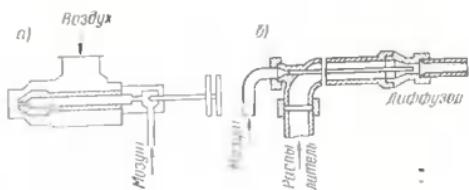


Рис. 8. Форсунки

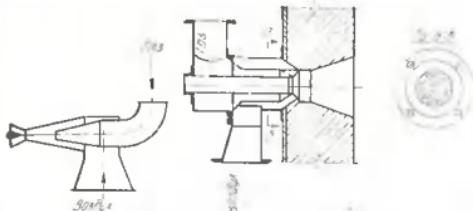


Рис. 9. Наиболее распространенные конструктивные схемы газовых горелок

Необходимо отметить, что форсунки высокого давления менее экономичны, чем форсунки низкого давления.

Ко второму типу относят механические форсунки, снабженные наклонечниками различной конфигурации. Наиболее распространение получили форсунки с винтовыми или тангенциальными каннами, через которые топливо вытекает под давлением.

ГОРЕЛКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

Газообразное топливо сжигают факельным способом. Сущность этого способа состоит в том, что струя газа горает в окружающей струе воздуха. Устройства для факельного сжигания газа называют горелками.

Различают горелки неполного и полного смешивания газа и воздуха.

В горелках неполного смешивания газ и воздух смешиваются по выходе из горелки.

В горелках полного смешивания происходит более совершенное смешивание газа и воздуха в самой горелке. В результате при выходе из горелки газовоздушная смесь воспламеняется, и горение происходит полностью и почти мгновенно. В последнем случае достигаются более высокие уровни температур вследствие незначительного избытка воздуха.

В зависимости от свойств газообразного топлива, степени нагрева газа и воздуха и технологических условий газовые горелкиывают самых разнообразных конструкций и размеров. Две наиболее распространенные конструктивные схемы газовых горелок показаны на рис. 9, а, б.

ГОРЕЛКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

Пылевидное топливо сжигают в горелках, которые в большинстве случаев представляют собой трубу диаметром 100—150 мм. По внутренней полости трубы пылевоздушная смесь поступает со скоростью 50—70 м/с.

Пылеугольные горелки для изменения положения факела делаются поворотными и выдвижными.

Пламя, образующееся при горении пылевидного топлива, обладает большим теплонизлучением, чем при горении газообразного топлива, вследствие находящихся в нем раскаленных частиц твердого углерода. Конструктивная схема пылеугольной горелки показана на рис. 116.

§ 15. ВЫБОР ТОПЛИВА И МЕТОДЫ ЕГО СЖИГАНИЯ

Выбор топлива и методы его сжигания определяются режимом работы печей. При конвективном режиме процесс сжигания топлива осуществляется вне рабочего пространства печи или вне конвективной зоны (для печей со сложным теплообменом).

В тех случаях, когда печь снабжена отдельной топкой, на выбор топлива не накладывается особых ограничений, так как объем топки выбирают из условий сжигания в нем необходимого количества топлива. Рекомендуется выбирать наиболее рациональные короткопламенные горелки и форсунки, чтобы объем топочной камеры был минимальным, а полное сгорание топлива достигалось бы при наименьшей избыточности воздуха. Для жидкого топлива предпочтительнее форсунки низкого давления. Удельная теплота сжигаемого топлива в этом случае особого значения не имеет, поэтому можно использовать некоксортное топливо.

Для получения заданной температуры теплоносителя перед входом в рабочее пространство печи топочные газы следует разбавлять дымом или частично возвращаемыми продуктами горения, т. е. осуществлять рециркуляцию. Последнее с теплотехнической точки зрения более рационально, так как в меньшей степени снижается коэффициент полезного использования тепла.

В тех случаях, когда печь имеет самостоятельные горелки, требования к топливу существенно возрастают. В качестве топлива применяют очищенный газ, удельная теплота сгорания которого обеспечивает получение устойчивых факелов небольшого объема.

Расположение соленых горелок в печах должно быть таким, чтобы непосредственная радиация факелов на поверхность нагрева была минимальной и чтобы по возможности обеспечивалась циркуляция газов в рабочем пространстве.

В случае равномерно распределенного радиационного режима работы печей важнейшим критерием выбора топлива является его способность давать пламя той или иной светимости. Чем больше углеродородов в горючем газе (CH_4 и особенно C_2H_6), тем больше оснований получить пламя повышенной светимости от разложения углеводородов и выделения углеродистых частиц.

Все виды жидкого топлива, особенно пылевидного, могут быть очень эффективными, так как создают сильно светящееся пламя.

Сжигание топлива должно быть организовано таким образом, чтобы способствовать естественной карбюрации пламени и получе-

нию максимальной температуры горения. Процесс перемешивания газа и воздуха должен осуществляться вне горелки, причем быстро, чтобы обеспечить сжигание в малом объеме. При этом используют предварительный подогрев газа, так как он способствует естественному карбюрированию пламени.

Для сжигания газа могут быть использованы горелки различных конструкций, однако они должны удовлетворять одному требованию: в пространстве, где осуществляется процесс смешивания газа и воздуха, должна быть высокая температура, и это пространство должно энергично облучаться раскаленными стенами и пламенем.

При использовании жидкого топлива целесообразно применять форсунки низкого давления, так как форсунки высокого давления дают длинный факел, которому свойственен свой температурный режим, отличный от температурного режима остального пространства. Конструкция форсунок низкого давления может быть разнообразной, но предпочтение следует отдавать форсункам с двуступенчатым распыливанием.

При горении пылевидного топлива светимость пламени всегда высока, поэтому при его сжигании необходимо получить равномерную температуру по всему объему рабочего пространства. Это достигается путем соответствующего распределения горелок.

Важнейшую роль в организации направленного радиационного режима работы печей, как и в предыдущем случае, играет светимость пламени. Поэтому предпочтение нужно отдавать тем видам топлива, которые создают светящиеся пламя, например: газообразные топлива, содержащие углеводороды и смолы, различные сорта мазута и пылевидное топливо. Рассматриваемый характер теплообмена предполагает неравномерное распределение температуры в пламени, особенно в слое, прилегающем к поверхности нагрева, где температура и светимость пламени должны быть выше, чем в остальной части.

Чтобы пламя сохраняло свою индивидуальность на всем протяжении зоны, где создается направленный теплообмен, горелки должны быть достаточно мощными, а их смешивающая способность должна соответствовать потребной длине пламени.

В случае сжигания жидкого топлива следует отдавать предпочтение форсункам высокого давления, дающим длинное «средоточенное» пламя.

При направленном косичном радиационном режиме работы печей требования к светимости пламени значительно хуже, чем при других режимах работы печей. В связи с этим при направленном радиационном режиме с успехом могут быть использованы различные виды жидкого, газообразного и твердого топлива. При работе печей на твердом топливе рассматриваемый режим теплообмена создается автоматически, поскольку пламя из топки направляется в Верхнюю часть рабочего пространства, где создается наиболее высокая температура.

Требования к сжигательным устройствам также невысоки. Условно могут применяться горелки самых разнообразных конструкций, однако чем меньше удельная теплота сгорания топлива, тем выше должны быть требования к горелкам с точки зрения интенсивности смешивания газа и воздуха.

При сжигании жидкого топлива более целесообразно применять форсунки пылевидного заваления, а иногда и механические форсунки. Следует отметить, что режим направленного косвенного теплообмена применим для печей, в которых температуры относительно низки, так как процесс горения осуществляется вдали от поверхности нагрева.

В случае слоевого режима работы печей выбор топлива и способа его сжигания определяются видом слоя.

Ранее указывалось, что в теории слоевого теплообмена выделяют три вида (или состояния) слоя: плотный, кипящий и взвешенный.

В зависимости от вида слоя процесс горения и требования, предъявляемые к топливу, различные.

Если рассматривается плотный фильтрующий слой, то процесс горения топлива зависит от трех основных факторов: способа введения топлива, соотношения вводимых количеств кислорода воздуха и топлива и температурного уровня в зоне высоких температур.

Применяют следующие способы введения топлива: а) введение топлива непосредственно в зону высоких температур; б) введение топлива в холодную часть слоя вместе с материалом, подвергаемым тепловой обработке; в) смешанный способ, представляющий собой комбинацию двух первых способов.

При введении топлива в зону высоких температур можно использовать практически любые виды топлива. Если применяют газообразное топливо, то топочное пространство организуется непосредственно в самой шахте, вблизи горелок. Если применяют твердое или жидкое топливо, то оно сжигается в отдельных топках, примыкающих к шахте.

В случае введения топлива вместе с сырьевыми материалами представляется возможность обеспечить необходимое распределение топлива по сечению слоя и достигнуть равномерной работы печи.

Целесообразно использовать термически обработанное твердое топливо с высоким содержанием несгоревшего углерода (85–90%), например, древесный уголь, кокс, т. е. топливо, обособленное от летучих веществ. Из термически необработанного топлива можно применять угли с малым содержанием летучих, например антрацит (70% углерода).

При смешанном способе введения топлива в зону высоких температур можно подать практически любые виды топлива, обеспечивающие при сгорании необходимый температурный уровень. На практике для этой цели используют чалозольное и малосернистое

пылевидное топливо и природный газ. Важным преимуществом смешанного способа является возможность сокращения расхода дорогостоящего и дефицитного кокса.

В печах, работающих по принципу кипящего слоя, применяют твердое, жидкое и газообразное топливо. Газообразное топливо подают вместе с воздухом через решетку, расположенную ниже слоя. Предварительное смешивание газа и воздуха не требуется. Жидкое топливо подается в распыленном состоянии также вместе с воздухом через решетку или инжектируется в нижнюю часть слоя.

Твердое топливо можно применять только в дробленом зернистом состоянии. Ряд исследований процесса газообразования в кипящем слое показывает, что этот процесс аналогичен процессу в неподвижном слое.

В случае тепловой обработки во взвешенном слое, как и в предыдущем, используют твердое, жидкое и газообразное топливо.

Основные требования к топливу обуславливаются тем, что процессы, протекающие во взвешенном слое, должны заканчиваться в пределах реакционной зоны, причем время на осуществление этих процессов измеряется секундами. Если используется газообразное или жидкое топливо, то создают необходимые условия для смешивания топлива и воздуха.

При использовании твердого топлива в пылевидном состоянии размер частиц его должен быть таким, чтобы обеспечивалось полное сжигание за время процесса. Чем больше содержание летучих компонентов в топливе, тем более крупное по фракционному составу оно может быть применено.

ГЛАВА VI. ПРОЦЕСС СУШКИ И СУШИЛКИ В ТЕХНОЛОГИИ СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сушкой называют процесс удаления физико-химической (адсорбционной или осмотической) и капиллярной влаги из твердых материалов в результате ее испарения.

Различают естественную и искусственную сушку. Естественная сушка материалов или керамических изделий протекает при атмосферных условиях без дополнительной тепловой энергии.

Искусственную сушку осуществляют в тепловых установках, называемых сушилками. Этот процесс протекает в условиях теплообмена высушиваемых материалов с источниками тепловой энергии. В процессе искусственной сушки тепло к высушиваемому материалу подводят непосредственно теплопроводности, радиации или конвекции. В соответствии со способами передачи тепла к высушиваемому материалу выделяют три группы сушилок: контактные, радиационные и конвективные.

Удаление влаги из твердых материалов или изделий осуществляется как результат трех взаимно связанных процессов: парообразования из поверхности материала; перехода пара с поверхности

материала в окружающую среду (внешняя диффузия); перемещение влаги внутри материала в виде жидкости или пара (внутренняя диффузии).

Движение влаги внутри материала зависит в основном от его структуры и происходит под влиянием градиента влажности (влагопроводности) и градиента температуры (термовлагопроводности) в направлении уменьшения влажности или температуры.

Процесс сушки сопровождается уменьшением размеров высушиваемых материалов — усадкой. Вследствие усадки внутри материалов возникают напряжения, которые могут вызывать их разрушение.

Усадочные напряжения прямая пропорциональны перепаду влажности между серединой и поверхностью материала. Для каждого конкретного материала существует максимально допустимый перепад влажности, определяемый интенсивностью процесса сушки и механическими характеристиками материала.

Измельченные сырьевые материалы в процессе сушки практически не разрушаются, в то время как керамические изделия легко разрушаются даже при малых значениях перепада влажности. Поэтому для сушки сырьевых материалов и керамических изделий используют различные режимы и различные сушильные агрегаты.

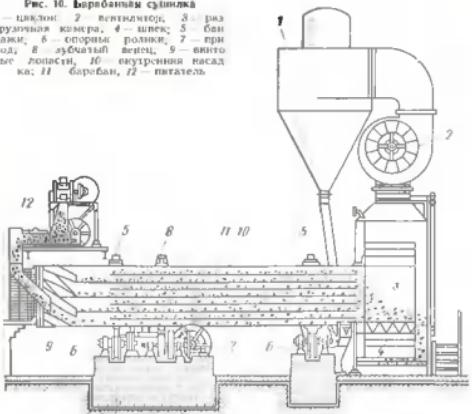
Тем не менее ко всем сушилкам предъявляются следующие общие требования: максимальная скорость сушки и высокое качество высушенного материала; минимальный расход тепла на единицу продукции; равномерность процесса сушки по всему объему сушилки; легкость управления процессом сушки.

§ 16. СУШИЛКИ ДЛЯ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для сушки сырьевых материалов на современных заводах используют барабанные, ленточные, пневматические и распылительные сушилки. Теплонапедача в этих сушилках осуществляется конвекцией, причем теплоноситель характеризуется высокой скоростью движения, высоким теплосодержанием и низкой относительной влажностью. Указанные параметры теплоносителя в сочетании с большой контактной поверхностью высушиваемого материала создают наилучшие условия интенсификации процесса сушки.

Барабанные сушилки (рис. 10) широко используются для сушки сыпучих и мелкокусковых материалов. Материал, подвергаемый сушке, поступает в наклонный (под углом 4–6°) полый барабан, при вращении которого передвигается вниз к разгрузочному устройству. При прохождении по барабану материал высушивается дымовыми газами или горячим воздухом, движущимися в одном направлении с материалом. Организация одностороннего движения материала и теплоносителя способствует саморегулированию работы сушилки: мелкие частицы, срок сушки которых должен быть меньше, быстрее проходят через барабан, чем более крупные, высушиваемые за более продолжительный срок.

Рис. 10. Барабанные сушилки
1 — циклон; 2 — вентилятор; 3 — разгрузочная камера; 4 — шnek; 5 — барабан; 6 — опорные ролики; 7 — привод в зону сушки; 8 — вентилятор; 9 — возвратные газы; 10 — внутренняя насадка; 11 — барабан; 12 — питатель.



Для интенсификации работы сушилки барабаны снабжают различными системами внутренних теплообменных устройств, из которых наиболее часто применяют певильные занавесы и подъемно-пониженные системы. С входного конца барабана устанавливают лопасти или ковши для равномерной загрузки материала по сечению сушилки. Высушенный материал ссыпается в бункер, находящийся в разгрузочной камере, и удаляется конвейером.

Производительность барабанных сушилок характеризуется количеством влаги, испаряемой в 1 м² барабана за 1 ч. Расход тепла на испарение 1 кг влаги в среднем составляет 4000 кДж. Для уменьшения тепловых потерь применяют барабаны с двойными стенками и теплоизоляцией между ними.

В последнее время получили распространение трехбарабанные сушилки с рециркуляцией теплоносителя.

Ленточные сушилки (рис. 11) в технологии силикатных материалов используют для сушки гранулированного сырья. Исходный материал через бункер поступает на ленту системы конвейеров, расположенных друг под другом. С ленты первого конвейера материал попадает на ленту второго конвейера и т. д. С ленты последнего конвейера материал направляется на разгрузку.

Теплоноситель (горячий воздух) поступает в сушилку спираль из калорифера. Организация нижней подачи теплоносителя способствует смягчению режима сушки и сохранению гранул.



Рис. 11. Ленточная сушилка
1 — камера сушки; 2 — боксировочная линия; 3 — нагрева барботаж; 4 — охлаждения барботаж; 5 — вибрационный питатель

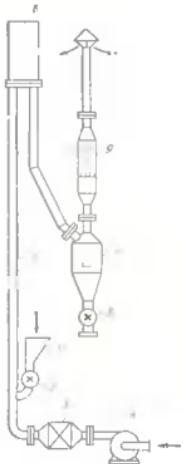


Рис. 12. Пневматическая сушилка
1 — труба; 2 — компрессор; 3 — вентиль; 4 — горизонтальная труба; 5 — вертикальная труба; 6 — форсунка; 7 — вентиль

Пневматические сушилки (рис. 12) предназначены для сушки мелкокусковых материалов со средним размером отдельных частиц до 20 чм и представляют собой сушильные трубы диаметром до 1 м. Сушильная труба соединена в один блок с мельницей, куда загружается высушиваемый материал. Материал перемещается по сушильным трубам потоком теплоносителя, скорость которого превышает скорость питания наиболее крупных кусков (обычно 10—10 м/с). Вследствие кратковременности контакта теплоносителя с материалом (1—5 с) эта сушилка пригодна для термически нестабильных материалов даже при высокой температуре сушильного агента.

Распылительные сушилки (рис. 13). В такой сушилке материал в виде водной суспензии или эмульсии распыляется механическими или пневматическими форсунками и высушивается в потоке горячего теплоносителя. Благодаря большой удельной поверхности распыленного материала процесс испарения влаги проходит интенсивно, и время сушки составляет 15—30 с. При весьма быстрой сушке температура поверхности частиц, даже при высокой температуре теплоносителя, близка к температуре адабатического испарения чистой влаги.

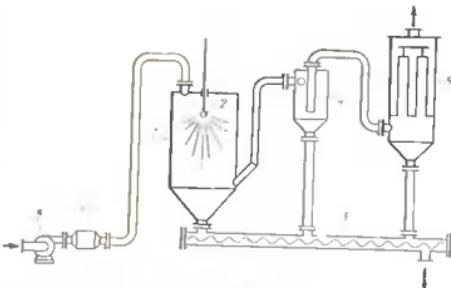


Рис. 13. Распылительная сушилка
1 — камера сушки; 2 — форсунка; 3 — ниппель для высушиваемого материала; 4 — циклон; 5 — рукояточный фильтр; 6 — вентилитор; 7 — калорифер

Распылительные сушилки снабжают аппаратами для улавливания уносимых частиц высушиваемого материала.

§ 17. СУШИЛКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В производстве керамических изделий используют преимущественно туннельные и конвейерные сушилки непрерывного действия. Сушилки периодического действия применяют лишь при выпуске небольших партий керамики, обжигаемой по разным режимам. Сушилки периодического действия еще сохранились в производстве строительного кирпича. В этом случае они обогреваются горячим воздухом, а иногда и продуктами сжигания твердого топлива в колывевых печах. С заменой колыбельных печей на туннельные периодические сушилки также заменяются туннельными.

В туннельных сушилках непрерывного действия изделия перемещаются в канале на вагонетках, а в конвейерных — в канале или в камере на ленточных, роликовых или подачных конвейерах.

П каждой зоне канала в соответствии с заданным режимом сушилки автоматически поддерживаются необходимые условия: температура, влажность и скорость циркуляции теплоносителя. Изделия последовательно проходят через зоны со стабильными условиями сушилки, заданной скоростью, чем обуславливается соответствующая производительность сушилки.

В сушилках периодического действия загруженные в камеру изделия неподвижны, а необходимые в каждый период сушилки условия обеспечиваются изменением упомянутых параметров теплоно-

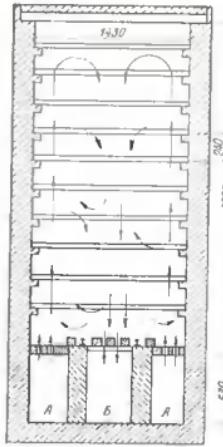


Рис. 14. Камерная сушилка периодического действия

ситета. Поддержание заданного режима сушки осуществляется квадрационным исполнителем или сложными системами автоматического регулирования по заданной программе. Принципиальность сушилок непрерывного действия особенно ярко проявляется при их включении в автоматические производственные линии.

КАМЕРНЫЕ СУШИЛКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Камерные сушилки периодического действия проектируют для работы по схемам однократного и многократного насыщения теплоносителя. В сушилках однократного насыщения теплоноситель отработанный воздух полностью удаляется в атмосферу. В результате он уносит много тепла, не использованного в сушильной камере. В более экономичных сушилках многократного насыщения одна часть отработанного теплоносителя удаляется в атмосферу, а другая возвращается в сушилку после разбавления сухим горячим воздухом. Температура и влажность многократно рециркулирующего теплоносителя изменяются в соответствии с заданным режимом, регулированием количества и температуры добавляемого воздуха, паровыми или газовыми калориферами.

Целесообразно использовать горячий воздух из зоны охлаждения туннельных печей, автоматически регулируя его температуру подсмесью воздуха из атмосферы. Камеры сушилок периодического действия, применяемые на кирпичных заводах (рис. 14), имеют в стенах выступы, на которые укладывают рамки с кирпичом, доставляемые вагонетками со сдвижущим механизмом. В наиболее распространенных сушилках камеры имеют длину 8–13 м, ширину 1,2–1,5 м и высоту 2,3–3 м. Камеры объединены в блоки с общей вентиляционной системой для подачи горячего воздуха или дымовых газов через каналы и отбора отработанных газов. Подача теплоносителя по схеме однократного насыщения заменяется на современных заводах рециркуляцией газов с многократным насыщением теплоносителя. Вместимость одной камеры 3000–3600 шт. кирпича, продолжительность сушки 35–50 ч.

ТУННЕЛЬНЫЕ СУШИЛКИ

В туннельных сушилках, как и в туннельных печах, вагонетки с загруженными изделиями проталкиваются через канал в соответствии с заданным режимом сушки. Эти сушилки получили широкое распространение преимущественно в производстве огнеупоров и кислотупоров, грубой строительной керамики, санитарной керамики и крупногабаритных изоляторов. По схеме циркуляции теплоносителя туннельные сушилки можно разделить на противоточные и многозонные с рециркуляцией и регулированием теплообмена в каждой зоне применительно к отдельным стадиям сушки. При этом теплоноситель, использованный в одной зоне, после соответствующего разбавления воздухом и подогрева подается в следующую зону для повторного использования.

Изделия, отформованные полусухим прессованием, загружают непосредственно на вагонетки туннельных печей, которые последовательно проходят через канал противоточной сушилки в печной туннель. При этом устраивается дополнительная трудоемкость загрузки и разгрузки сушильных вагонеток.

Загрузка ических вагонеток автоматаами, отбирающими отформованный кирпич от прессов, расположенных рядом с путями для подачи вагонеток в туннельную сушилку, сокращает применение тяжелого ручного труда. В сушилке используется горячий воздух, поступающий из зоны охлаждения туннельной печи. Подачу теплоносителя в сушилку и отбор после его прохождения через садку вагонеток выполняют в зависимости от заданного режима сушки в разных вариантах.

На рис. 15 показана схема противоточной сушилки с подачей горячего воздуха или дыма через каналы 3, 4 и таким же отбором насыщенного влагой теплоносителя вентилятором 2. Часть тепло-

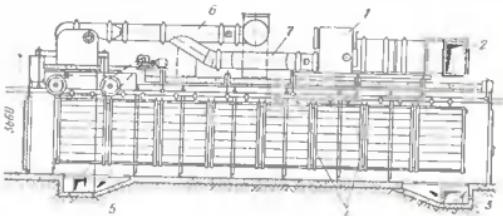


Рис. 15. Противоточная сушилка с рециркуляцией воздуха
1 — калорифер, 2 — вентилятор для подачи воздуха, 4 — путь вагонеток, 5 — канал для отбора отработанного воздуха, 6 — труба, 7 — канал для повторного использования воздуха

носителя возвращается вентилятором в зону усадки изделий, изготовленных методом пластического формования, через каналы 3. Воздаляемый геллоноситель может подогреваться в калорифере 1, чем обеспечиваются широкие возможности регулирования режима при интенсификации сушки.

Большое разнообразие размеров и формы изделий в производстве разных видов технической, строительной и хозяйственной керамики, а также способов формования из керамических масс разного состава обусловило появившиеся требования к режиму сушки и точности регулирования работы сушилок. Этим требованиям в производстве среднегабаритных изделий удовлетворяют многозонные туннельные сушилки с устройствами для регулирования температуры и влажности воздуха в каждой зоне.

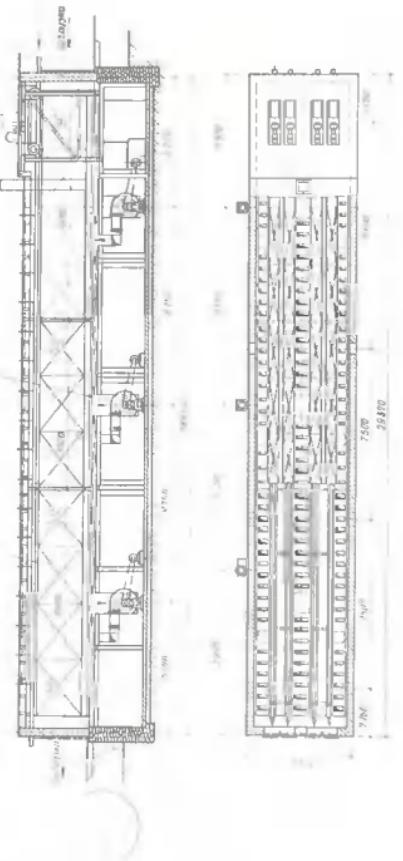
При сушке изоляторов и полых изделий в гипсовых формах используют преимущественно подвесные вагонетки, загружающие изделиями у рабочих мест формовщиков. Зональные сушилки обрабатывают в блоках по четыре—шесть линий, каждая из которых имеет отдельный цепной толкатель для регулирования продолжительности сушики. При разных режимах сушики линии в блоках разделяют перегородками, и скорость сушики в них регулируют количеством геплонометра, подаваемого в разные зоны.

Рециркуляцию газов в отдельных зонах осуществляют вентиляторами, а температуру — калориферами, размещенными в целях экономии площади на перекрытиях сушки или в подвальном помещении. В виде примера приводим описание наиболее распространенной многозонной сушилки, которая может использоваться для сушки среднегабаритной технической керамики, санитарных, килемотопорных и других изделий разнообразного ассортимента (рис. 16). Размеры туннеля сушилки: длина 28,52 м, ширина 4,2—4,7 м, высота 2,7—3,2 м. В туннеле проложены четыре колен, для подвесных вагонеток — две. Туннель разделен на три зоны, в первой и третьей зонах находятся по 16 вагонеток, во второй — 12. Стены сушилки толщиной 250 мм выполнены из теплоизоляционного кирпича. Перекрытие сушилки — жесткобетонная плита с теплоизолирующей засыпкой. Рельсы для подвесных вагонеток поддерживаются подвесками, укрепленными на фермах цокового перекрытия.

Вагонетки движутся через туннели четырьмя самостоятельными цепями толкателей / . Каждый ряд вагонеток может двигаться с разным ритмом толчения, и, таким образом, в одном туннеле можно установить четыре самостоятельных режима сушки в соответствии с ассортиментом загруженных на вагонетки изделий.

Три вентиляционные установки 3 для ширкуляции паровоздушной смеси в отдельных зонах сушки расположены в подвальном помещении, которое по чистотным условиям не может использоваться для иных промышленных нужд.

В однотажном здании вентиляторы и каториферы устанавливаются на стальном каркасе перекрытия сундука.



1—*MECHIN' RAVIN'* 2—*RATONCHIK*, 3—*Re. HYPNOTICOIDER* 4—*WILSON* 5—*WILSON*

Все три установки оборудованы по одной схеме и состоят из вентилятора (рис. 17), смесительной камеры 2, трубы 3, подводящей горячий воздух из зоны охлаждения туннельной печи, и труб 4, разводящих кондиционированную паровоздушную смесь по длине зоны у боковых стен туннеля и шиберов, регулирующих работу установок. Влажный отработанный воздух застасывается через горизонтальный, расположенный на полу посередине туннеля, канал 5 в смесительную камеру 2 и смешивается здесь с горячим сухим воздухом.

Регулируя подачу горячего и влажного воздуха, можно установить необходимую для каждой зоны влажность и температуру паровоздушной смеси.

В тех случаях, когда в соответствии с намеченным режимом сушки в смесительную камеру подается мало первичного воздуха и много отработанного влажного, температура паровоздушной смеси под-

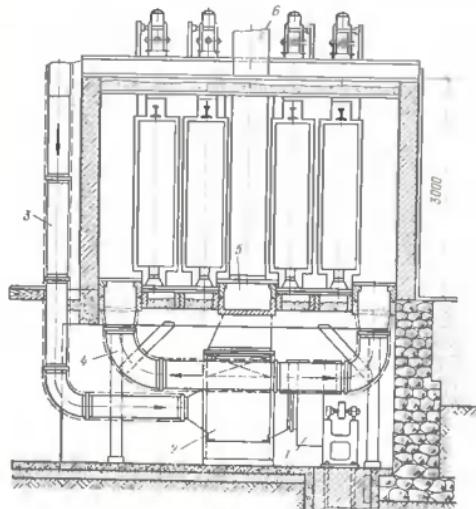


Рис. 17. Схема вентиляционной установки сушилок
1 — вентилятор; 2 — смесительная камера; 3 — труба для подачи горячего воздуха; 4 — трубы, разводящие паровоздушную смесь; 5 — канал для всасывания влажного воздуха; 6 — труба

держивается на заданном уровне паровым калорифером. Часть отработанного влажного воздуха отводится из каждой зоны сушилки в атмосферу через трубу 6, присоединяемую к горизонтальному воздуховодящему каналу 5.

КОНВЕЙЕРНЫЕ СУШИЛКИ

Конвейерные сушилки отличаются от туннельных перемещением изделий в канале или в камере ленточными, роликовыми и полотняными конвейерами. При одновременной загрузке конвейеров конвейерные сушилки не могут конкурировать с туннельными в производстве массивных или крупногабаритных полых изделий. Поэтому их используют преимущественно для сушки по скоростным режимам малогабаритной технической керамики, облицовочных плиток, хозяйственного фарфора и фаянса. Наибольшее признание получили конвективные сушилки с использованием горячего воздуха (гравийных отходов) из зон охлаждения туннельных печей. Радиационно-конвективные сушилки широко используют при скоростных режимах сушки в автоматических линиях для производства облицовочных плиток.

КОНВЕКТИВНЫЕ КОНВЕЙЕРНЫЕ СУШИЛКИ

Конвективные сушилки с полотняным (полосочным) конвейером, перемещающим изделия в сушильной камере по сложной петлеобразной трассе, впервые появились в производстве хозяйственной фарфора и фаянса. Свободно подвешенные полки выносной ветви 6 (рис. 18) конвейера 3 подаются к формовочным полуавтоматам 4 и загружаются заформованными в глиняные формы изделиями. У ряда розочек окна 2 сушилки изделия снимаются с фона конвейера 1. На этом конвейере организуется поточная обработка высушенных изделий. Глиняные формы, оставшиеся на полках, подаются выносной ветвью 5 конвейера к полуавтоматам 4. Выносными ветвями полотняного конвейера без ручного труда конвейерные сушилки включаются в механизированные и автоматические линии керамических заводов.

Конструкция шагнирной подвески полок (рис. 19, а, б) позволяет при проектировании сушилок максимально использовать высоту цеха и перемещать изделия по любой трассе с горизонтальными, вертикальными или П-образными ветвями конвейера. В последнем варианте (см. рис. 19, б) ветви конвейера разделяются П-образными перегородками 1—7 на 11-образные камеры, в которые через каналы подается теплоноситель из калорифера или из зоны охлаждения туннельных печей. Шиберами регулируют подачу теплоносителя и интенсивность генерации в отдельных камерах сушилки.

Горячий воздух циркулирует по принципу противотока с высушиваемым полуфабрикатом. Сушилки с полотняными конвейерами работают с однократным насыщением воздуха и высокими скоро-

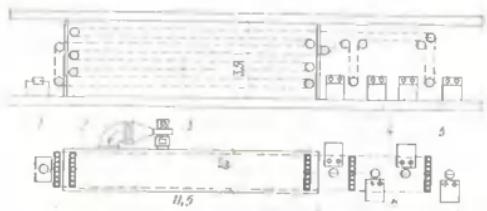


Рис. 18. Схема сушилки с горизонтальными ветвями конвейера:
1 — ветвь для поглощения избытка влаги; 2 — разгрузочное оконо; 3 — конвейер для транспортировки изделий; 4 — захватывают

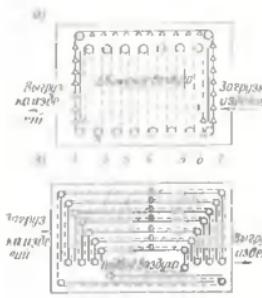


Рис. 19. Схемы сушилок:
с вертикальными ветвями конвейера; б
с оптимальными зонами обогревания

жной циркуляцией теплоносителя в полостях изделий обусловили недостаточную эффективность сушки в описанных конвейерных сушняках, несмотря на благоприятные возможности влагопрекращения в тонкостенных изделиях.

Метод струйной сушки полых изделий, недавно разработанный и проверенный на зарубежных и отечественных заводах, обеспечил использование скоростных режимов в производстве хозяйственного фарфора. Струя теплоносителя с температурой 150–250 °С падает с большой скоростью в открытую полость изделия, омыая его дно и стени, а затем удаляется в атмосферу, не перетрагивая гипсовых форм. Гипсовые формы, в которых находятся заформованные изделия, с влажностью около 20% не омываются теплоносителем с тем-

пературой выше 70 °С, что позволяет использовать высокие температуры и скорости конвективного теплообмена без быстрого изгиба форм.

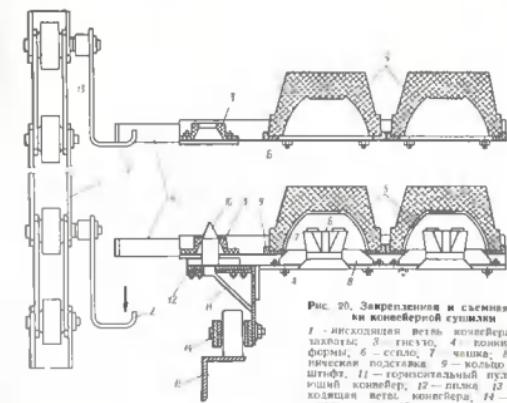


Рис. 20. Закрепление и сушка полых конвейерных сушняков:
1 — исходящая ветвь конвейера; 2 — захваты; 3 — гнусы; 4 — болты; 5 — формы; 6 — стопы; 7 — чашки; 8 — ко-
ническая подставка; 9 — кольцо; 10 — штифт; 11 — пневматический привод-
ящий конвейер; 12 — пиль; 13 — вос-
ходящая ветвь конвейера; 14 — разчи-
щающие щетки; 15 — опорный цаплевод

пературой выше 70 °С, что позволяет использовать высокие температуры и скорости конвективного теплообмена без быстрого изгиба форм.

Разработанная исследовательским институтом керамики (ГИКИ) струйная сушилка оборудована двумя цепными конвейерами с горизонтальным перемещением для сушки чашек в гипсовых формах и с нетлеобразным для автоматического освобождения форм от чашек и подсушивания их перед следующим циклом формования.

Нисходящая ветвь 1 конвейера (рис. 20) непрерывного действия с захватами 2 опускает в положение А пиль 12 конвейера 13. Пульсирующий конвейер 13 состоит из двух бесконечных роликовых цепей 11, перемещающихся под междуду положениями А и Б (рис. 21) по премя сушки чашек с ритмом, равным 7 с на перечечение, и паузой, равной 22 с для укладки очередной порции на кольца 9 (см. рис. 20). В течение 22 с полости чашек совмещаются с соплами 6, через которые вдувается горячий воздух. Продолжительность сушки регулируется количеством позиций конвейера 13, на которых включена подача воздуха в полости чашек. Во время сушки размеры чашек сокращаются, они отделяются от форм и опускаются на конические подставки 8 (см. рис. 20), которые предохраняют их от деформации (овальности).

По окончании процесса сушки восходящая ветвь конвейера снимает пиль с освободившимися формами и подает с помощью звездочек 1 — 10 (см. рис. 21) в полуавтомат 13 для формования чашек,

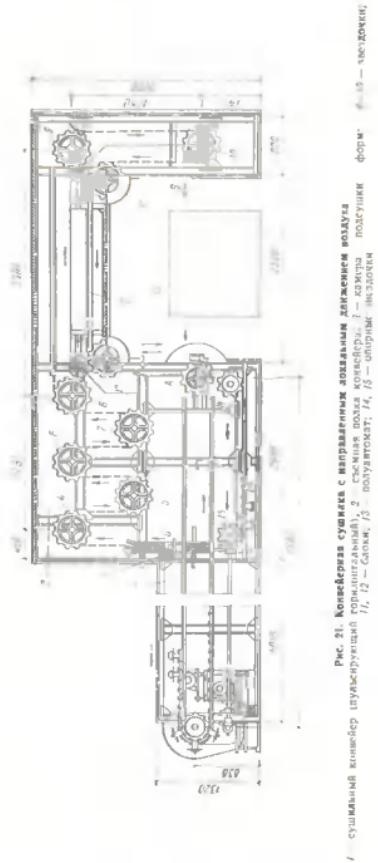


Рис. 21. Коньковая санка с направляющим ложементом волной. Установленный на направляющем ложементе коньковый скользунок. 1 — коньковый скользунок; 2 — направляющий ложемент волной; 3 — направляющая скоба; 4 — скользунок; 5 — направляющая скоба; 6 — направляющий ложемент волной.

а затем на конвейер 2 через блоки H , $I2$ в положение 1 , где инкапсуляция втулок конвейера 2 укладывает формы вместе с сырьем чашками на полку $I2$ конвейера I в струйной сундуке, размещенному между положениями A и B этого конвейера. В положении B полки с освободившимися формами снимаются с полок конвейера I восходящей ветвью конвейера 2 , и цикл повторяется.

Подсолнечные чашки при перемещении с положения B до положения G сгибаются с конвейера I для последующей обработки. Освободившиеся от чашек полы нижней ветви конвейера I возвращаются в положение B . Чашки укладываются на них фурмой находящейся ветви конвейера g , ссыпаясь в чашки.

Таким образом, при размещении формоочистки полуавтомата между ветвями конвейера получается компактная установка для формования, скоростной сушки и подачи изделий на дальнейшую поточную обработку.

РАДИАЦИОННЫЕ И РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНЫЕ СУШИЛКИ

В радиационных сушилках (рис. 22) тепло передается излучением от раскаленной поверхности излучателей к изделиям.

Мощность теплового потока в радиационных сушилках в несколько десятков раз превышает мощность потока в конвективных сушилках. Интенсивный радиационный нагрев и скоростные режимы сушки используются при небольшой толщине изделий.

Скорость сушки массивных изделий лимитируется влагопроводностью материала и скоростью поступления влаги из глубинных слоев к поверхности изделий. В этих условиях при радиационном нагреве возникает разная усадка по толщине изделия и, как следствие, его деформация или разрушение. В связи с особенностями радиационного теплообмена в по конструктивным соображениям радиационные и радиационно-конвективные сушилки применяются преимущественно в производстве тонкостенных изделий плоской формы при одновременной загрузке. Излучатели радиационно-конвективных сушилок продукты сжигания газа участвуют в конвективном теплообмене с изделиями, чем обеспечивается существенная экономия топлива при скоростных режимах сушки. В производстве облицовочных плиток радиационно-конвективные сушилки предусматривают для автоматических и механизированных линий

В качестве излучателей в промышленных сушняках используют преимущественно панели или трубы, обогреваемые газовыми горелками. Электрические излучатели не применяются из-за относительно высокой стоимости электроэнергии. В сушняках кирпичных заводов широко используют однорусные ленточные конвейеры из стальной сетки, а роликовые конвейеры — в одноруслых и многорусных сушняках. Радиационные сушняки с ленточными конвейерами используют в производстве облицовочных плин-

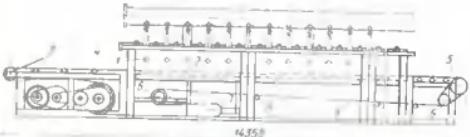


Рис. 22. Радиационный сушник с тенточным (сетчатым) конвейером
1 — туннель; 2 — вельвичевый конвейер;
3 — боковая преграда; 4 — излучатель;
5 — рабочая лента; 6 — вентилятор; 7 — вентиляционные отверстия;
8 — вентилятор; 9 — вентиляционные отверстия;
10 — вентилятор; 11 — радиационный канал;
12 — патрубок.

ток, мелких электронизоляционных и тому подобных изделий. Работа конвейеров сушников без применения ручного труда взаимосвязана с работой конвейеров, обрабатывающих разнообразные процессы обработки в механизированных линиях.

Сушкики с керамическими панельными излучателями и конвейером из проволочной сетки могут быть использованы в производстве тонкостенных плиток со скоростными режимами нагрева в течение 6 мин и охлаждения в течение 3 мин.

Панельная радиационно-конвективная сушкика Харьковского завода по производству плиток оборудована керамическими излучателями, расположенным в два ряда под сводом (рис. 23). Отработанный газ подается в камеру излучателя 4 через смеситель 1, а затем газовоздушная смесь подается в канал сушкики через отверстия 3 керамической панели 2. Диаметр отверстий 1,3 мм, поэтому газ сгорает у поверхности керамической панели, температура которой достигает 800 °C, чем обеспечивается скоростной режим сушки 6,6 мин.

Высущенные плитки при температуре около 150 °C охлаждают воздухом, поступающим из стальных коллекторов, расположенных на расстоянии 40 мм от поверхности плиток. Четырехмиллиметровые отверстия коллекторов, расположенные с шагом 25 мм, обеспечивают равномерное охлаждение плиток в течение 3 мин. Панельные излучатели можно использовать лишь для одностороннего нагрева плиток спереди, при нагреве снизу отверстия в керамических плитках излучатели засоряются.

Сушкикий канал собран из пяти секций длиной по 2,25 м. В трех секциях сушкики нагрев изделий осуществляется радиационными излучателями, а в двух секциях — конвективным противотоком продуктов сжигания газа. В результате теплотехнических исследований был разработан режим сушки фаянсовых плиток,

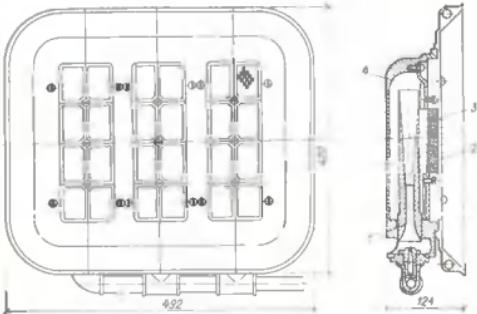


Рис. 23. Устройство панельной радиационной горячки

характеризуемый кривой (рис. 24) со средним подъемом температуры 28 °C в 1 мин.

Рассматриваемая сушкика имеет следующие характеристики:

температура газовой среды на расстоянии 150 мм от поверхности плиток 90—100 °C;

температура отходящих газов 100—120 °C, число работающих излучателей 34—36;

производительность при продолжительности сушки и охлаждения плиток 150 × 150 мм 9,6 чик около 2250 шт ч. Расход природного газа 14—15 м³ ч. Удельный расход тепла на 1 кг влаги 8000 кДж кг, длина сушкики 14,35 м, ширина канала 1,38 м, ширина ленты конвейера 1,1 м.

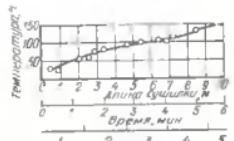


Рис. 24. Кривая радиационного нагрева фаянсовых плиток

ГЛАВА VII. ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

§ 18. ПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Печи периодического действия были первыми печами, в которых твердое топливо сжигалось в топках с регулированием режима на основе практического опыта обжигальщиков. Эти печи отличаются высоким расходом топлива, тяжелыми условиями ручной загрузки

и выгрузки изделий, малой производительностью и невысоким качеством продукции.

В XIX в. с расширением производства кирпича, черепицы, огнеупоров, канализационных труб печи периодического действия были заменены кольцевыми и многокамерными печами большей производительности и меньшим удельным расходом топлива.

В XX в. с развитием печной техники и технологии на новых заводах и при реконструкции действующих печи периодического действия кольцевые и многокамерные стали заменять туннельными. Многокамерные печи сохранились в основном для производства уникальных высококудожественных изделий разнообразного ассортимента, а также для исследовательских работ в лабораториях, институтах и для производства в полузаводских условиях. Отметим особенности устройства и работы некоторых типичных печей периодического действия.

Напольные печи, применявшиеся для обжига кирпича, имели стены, выполненные из обжигаемого в этих печах сырья, и причивные топки для сжигания твердого топлива. Штабель кирпича-сырца перекрывали уложенным плашмя кирпичами с зазорами, оставленными для выхода топочных газов через садку. Так как эти печи не имели сводов и дымовых труб, то их постройка не требовала существенных затрат. При восходящем потоке печных газов их равномерное распределение в садке не достигалось, и кирпич получался низкого качества. Такие печи применяли лишь в кустарном производстве кирпича и затем постепенно заменили многокамерными и кольцевыми печами.

Камерные печи с восходящим пламенем в соответствии с гидравлической теорией расщепления горячих газов в вертикальных каналах садки не давали равномерного нагрева отдельных ее участков и приводили к снижению качества продукции, что способствовало вытеснению их печами с нисходящим пламенем. Такие варианты печей применяются на некоторых заводах и в настоящее время.

По конструкции печи с нисходящим (обратным) пламенем подразделяются на прямоугольные и круглые однотажные печи для обжига оgneупоров и фаянса, двух- и трехэтажные круглые печи (горны) для обжига хозяйственного и технического фарфора и прямоугольные печи с выкатным подом для обжига высоковольтных изоляторов (оболочек, бушингов) высотой более 2 м и диаметр м до 1,2 м.

Прямоугольные печи объемом до 220 м^3 и размером $14 \times 4,2 \times 3 \text{ м}$ применяют для обжига динасовых, магнезитовых и других оgneупорных крупногабаритных фасонных изделий, обжигаемых по различным режимам. Такого же типа печи используют иногда и при обжиге круглогоабаритных кислотупорных изделий и канализационных труб. В удлиненной камере печи устраивают несколько пар топок для твердого топлива и канализированный под для отбора топочных газов дымососом через боров. Топочные газы проходят в основном к своду печи, а затем через садку и канализи-

рованный под отводятся в атмосферу или утилизируются. В верхней части перевальной стены предусматривают иногда отверстия для регулирования нагрева изделий в прилегающей части садки. При использовании в высокотемпературных печах жидкого топлива или газа в тончайших камерах устанавливают форсунки или горелки.

В США большие периодические круглые печи с диаметром камеры около 9,5 м и высотой от уровня пола до замка свода 4,8 м имеют 10 топок для жидкого топлива или газа. Такие печи и печи меньших размеров простой конструкции сооружают под открытым небом для обжига оgneупоров, канализационных труб и тому подобных изделий.

ОДНОКАМЕРНЫЕ КРУГЛЫЕ ПЕЧИ (ГОРНЫ)

Однокамерные печи (горны) с нисходящим пламенем до конца XIX века были наиболее широко применены в фаянсовом производстве.

Однокамерные круглые печи хотя и обеспечивают желательные условия обжига, но имеют весьма низкий тепловой коэффициент полезного действия. В связи с этим их заменили более экономичными туннельными печами. Использование однокамерных печей одновременно с более производительными печами объясняется искривленностью удобствами эксплуатации этих печей. Отдельные виды керамической продукции, например декоративную керамику и изделия «пестрого» ассортимента, проще обжечь обособленных камерах, в которых для каждой партии можно выбрать самостоятельный, наиболее благоприятный режим обжига. В то же время обжигать пеструю продукцию, требующую разных условий обжига, в туннельных печах было бы затруднительно и в некоторых случаях экономически невыгодно.

Конструктивные элементы печей определяются в основном видом топлива, температурой и темином обжига и некоторыми другими, менее значительными факторами.

Для иллюстрации приводим описание и характеристику работы однокамерной печи с нисходящим пламенем для обжига фаянсовой и майоликовой посуды.

Типичная однокамерная круглая печь с нисходящим пламенем для первого (бисквитного) обжига фаянса (рис. 25) имеет объем 164 м^3 , диаметр 7,8 м, высоту от уровня пола до замка свода 4,4 м и восемь топок для твердого топлива.

Дымовые газы из топок проходят нисходящим потоком через садку шамотных канселей с фаянсовыми изделиями и отбираются через подовые отверстия в газосборник большого объема (диаметром 5,7 м), что позволяет иметь равномерное разрежение во всех подовых камерах. Несмотря на большой пролет свода, под горна при температурах обжига фаянса не имел провисаний и не нуждался в частых ремонтках.

Асимметрическое примыкание борова к сборной камере при ее большем объеме не оказывает влияния на разрежение в подовых каналах, так как этот галосборник выравнивает разрежение на полу при нормальном сечении подовых каналов. Для равномерного распределения топочных газов в печной камере и устранения плохого обогреваемых углов особое внимание должно быть обращено на правильное пропорционирование живого сечения подовых вылетов к площади обслуживаемой части пода и различными для отдельных участков камеры скоростными напорами к сопротивлению садки в направлении движения газов.

Эмпириически принято и вполне оправдывается теорией движения газов увеличение живого сечения подовых каналов по отношению к площади пода по мере приближения к центру камеры. Для печей данного типа и размеров отношение площади отверстий к площади обслуживаемой части пода составляет на периферии 0,009—0,036, а в центре — 0,027—0,06.

В этой печи удовлетворительный обжиг полевошпатового фаянса на бисквит может получить в зависимости от качества топлива при повышении температуры до 1500° С в течение 20—25 ч с расходом в среднем 115 кг условного топлива на 1 м³ печной камеры.

Так как при полите втором обжиге фаянса теплоподготовка сводится к нагреву глазурованных изделий до температуры расплавления глазури и некоторой выдержке при этой температуре, то в этом случае допускается быстрое повышение температуры. Пределы скорости обжига полиготного фаянса обуславливаются лишь термической стойкостью обжигаемых изделий и необходимости выравнивания температуры по всей камере к началу плавления глазури. Это обеспечивает одинаковый для всех обжигаемых изделий период плав-

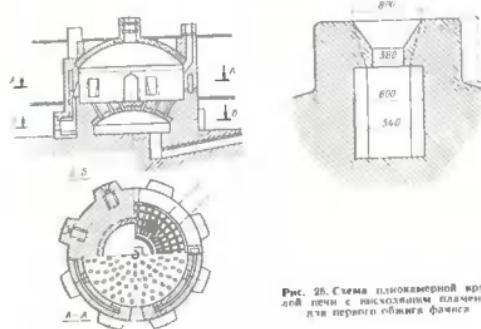


Рис. 26. Схема двухкамерной колодки печи с исходящими плашмя для первого обжига фаянса

ления глазури, ее хороший розлив и получение гладкой блестящей поверхности. Политой обжиг фаянса в камерах продолжается 15—18 ч.

Большие тепловые потери при обжиге керамических изделий в однокамерных печах послужили причиной для изыскания новых типов печей. Высокая температура отходящих газов, неизбежная при обжиге в однокамерных печах, позволяет использовать их при более низких температурах для обжига полуфабриката и вспомогательных производственных материалов, т. е. утилизировать тепловые отходы (по-видимому, отходы и происходящее общепринятое в производстве керамических изделий понятие «утыльный обжиг»).

Утилизация тепловых отходов, как правило, конструктивно решается путем постройки второй, а иногда и третьей камеры, непосредственно на камере для высокотемпературного обжига. Режим обжига в камерах второго и третьего этажей такого горна зависит от режима работы первой камеры, а также от тепловых потерь и подсосов воздуха при прохождении отходящих горячих газов из первой во вторую и третью камеры и в большинстве горнов не может быть точно отрегулирован по заданной кривой. Обжиг во втором и тем более в третьем этажах получается нестабильным по кочечным температурам обжига. В связи с этим во вторых этажах этих печей обычно производят обжиг фарфора на бисквит и канселей.

Конечная температура обжига фарфора на бисквит может колебаться от 850 до 1000° С без заметного влияния на качество продукции. Поэтому двухэтажные горны получили преимущественное применение на заводах по производству хозяйственного фарфора.

В производстве хозяйственного и электротолщинного фарфора конструкция двухэтажных горнов многократно изменялась при очередных ремонтах в целях большей равномерности и удобства регулирования обжига.

В наиболее распространном варианте такого горна в его нижней камере обжигается на твердом топливе глазурованный фарфор при температуре 1320—1350° С. Газы из топок 1 (рис. 26) подаются в подводное пространство, а затем исходящими потоками через каналы между столбами канселей и подовые отверстия 2 в сборные каналы 3, расположенные в толще пода камеры. Отработанные горячие газы через вертикальные каналы 4, обычно размещенные в стенах камеры между гончарными вылетами, и через подовые каналы второго этажа 5 подают в верхнюю камеру. Обращенный поток печных газов в политой камере при правильной конструкции основных элементов горна дает хорошее заполнение ее пламенем, равномерный обжиг и высокое качество продукции, но требует высокого мастерства обжигальников для регулирования температуры и состава смеси в окисительно-восстановительный периоды обжига.

Большинство горнов этого типа работает во втором этаже по принципу восходящего потока газов, которые, поступая из подовых вылетов, проходят через загрузку утильной камеры и удаляются в трубу. Поэтому для данной группы печей название «горны с об-

ратным пламенем» является недостаточно обоснованным. При продолжительном обжиге и естественном охлаждении с удалением горячего воздуха из нижней камеры через верхнюю камеру и вытяжные трубы период нагрева фарфора, обжигаемого на бисквит в верхней камере, получается достаточно продолжительным и обеспечивает полную дегидратацию и нормальную прочность полуфабриката. При ускоренном обжиге и охлаждении непрерывный нагрев на втором этаже приводит к неравномерному обжигу бисквита с преобладанием недожога.

Конструктивным недостатком горнов этого типа являются малая устойчивость футеровки стен и купола полигонной камеры, топочных вылетов и вертикальных газоходов, нагрев до высокой температуры, а также сводиков (козырьков), перекрывающих топочные вылеты, при сильном их шлаковании золой.

Отмеченные конструктивные и эксплуатационные недочеты круглых двухэтажных горнов начали устраиваться после Великой Октябрьской социалистической революции, когда развертывалась выпуск фарфоро-фаянсовой продукции путем повышенной загрузки печей и постройки дополнительных агрегатов. В первую очередь потребовалось повысить оборачиваемость печей периодического действия за счет сокращения продолжительности обжига и охлаждения.

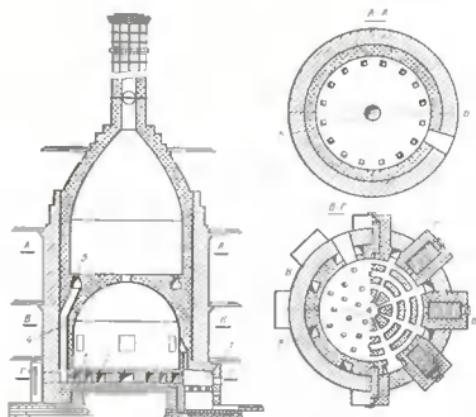


Рис. 26. Схема двухэтажного горна с нисходящим пламенем в первой камере и восходящим во второй

дения с 5 циклов до 8—10 в месяц и учитывать изменившиеся условия топливоснабжения.

При реконструкции круглых горнов были разработаны и освоены разные конструкции горнов с нисходящим пламенем и с разнообразными типами топочных устройств. Конструкторы печей добивались максимальной быстроты и равномерности обжига при сохранении высокого качества продукции и при наименее простом и легком обслуживании топочных устройств, быстрым охлаждением камер, минимальном расходе топлива, сокращении простое печи и затрат на капитальные и текущие ремонты, а также решении некоторых других задач завода местного значения.

Наиболее распространенная конструкция двухэтажного горна, в котором обе камеры работают с нисходящим пламенем, показана на рис. 27.

Из каждой топки 1 плача поступает в свысокостоятельный канал 2, размещенный под иском, и через вертикальные подовые вылеты поддается в кансельную садку изделий и под свод полигонной камеры. Омывая столбы капселий, печные газы опускаются в центральные части камеры и удаляются через отводящие радиальные подовые каналы 3 в центральную трубу 4.

Отработанные газы подаются центральной трубой под свод верхней камеры и, омывая капсельную садку изделий, направляются вниз к периферии, где собираются боковыми каналами, заложенными в стенах и выходящими в надподовую газообразную камеру 5. Из сборной камеры газы удаляются в дымовую трубу горна.

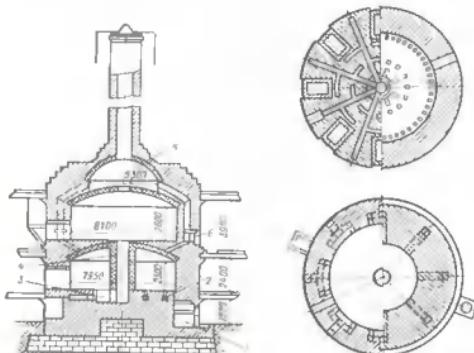


Рис. 27. Двухэтажный горн с нисходящими пламенем в первой и второй камерах

Для ускоренного охлаждения нижней камеры в ее своде устроены каналы, сообщающиеся при открывании шиберов 6 с боковыми каналами верхней камеры и газосборником.

В дальнейшем при реконструкции фарфорового горна применяли полугазовые топки 1 (рис. 28) и центральные трубы 2 в нижней и верхней камерах.

Движение точечных газов впервые для данного типа печей было разработано на основе гидравлической теории. Практика подтвердила правильность приведенных расчетов и возможность перехода от чисто эмпирических приемов конструирования печей к научно обоснованным методам их расчета.

Недостатком этой конструкции — довольно сложная система газоходов и двойных сводов, перекрывающих политуру и утильную камеры горна. Топочные газы в этом горне поступают в нижнюю камеру через распределительное кольцо 3 и вертикальные подовые каналы.

Распределительное кольцо выравнивает подачу газов по всей периферии камеры в случае неравномерной работы топок. При значительном гидравлическом напоре газов и сопротивлении подовых каналов недостаточная подача полугаза или воздуха из отдельной

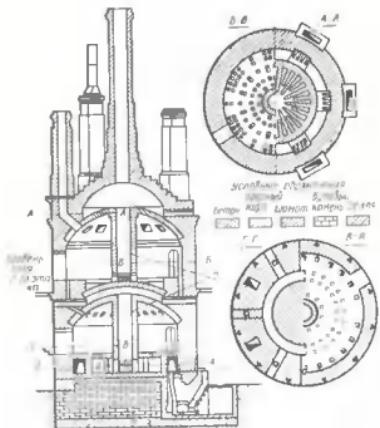


Рис. 28. Двухэтажный горн с полугазовыми топками и центральным отводом зыбовых газов

топки регулируется сmekными топками и тем обеспечивается равномерность нагрева камеры. Полугазовые топки как промежуточные между обычными и газовыми топками могут быть использованы и в других печах, работающих на твердом топливе.

К преимуществам полугазовых топок описанного горна относятся регулируемый, устойчивый режим их горения, возможность подсушкиания влажного топлива (древ или торфа) в шахтах топки, устойчивая температура печных газов и удобство загрузки топок, исключающее попадание в печную камеру холодного воздуха.

В полугазовых топках управление процессом горения облегчается регулированием подачи первичного и вторичного воздуха. Это обеспечивает равномерную и желательную атмосферу (окислительную или восстановительную) в печной камере с определенным избытком или недостатком воздуха.

На многих заводах тонкой керамики продолжается эксплуатация горнов периодического действия для обжига отдельных видов фарфора, майолики, кашемира и других изделий по специальным тепловым режимам, отличающимся от режимов, используемых в туннельных печах для производства массовой продукции. Реконструкция печей в основном направлена на их перевод с твердого топлива на жидкое или газообразное (мазут или природный газ). При этом достигается сокращение продолжительности обжига и более его точное регулирование. В результате реконструкции также существенно облегчается труд обжигальщиков и улучшаются условия выполнения смежных производственных операций.

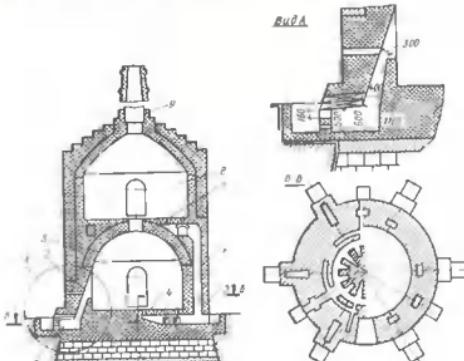


Рис. 29. Двухэтажный горн для обжига керамических изделий завода, работающего на природном газе

Производство фарфоровых изоляторов не требует предварительного обжига изделия в верхней камере. Поэтому при переводе двухэтажных печей на жидкое топливо в верхней камере дополнительно устанавливают форсунки, и глазурованные изоляторы в ней дожигаются при температуре 1300–1350°C.

Равномерный обжиг фарфора в больших камерах при использовании высококалорийного природного газа требует при его сжигании применения распыленной воды. Для этого горн оборудован выложенными в стенах нижней камеры десятью топками 1 (рис. 29), подающими через вылеты 2 продукты сгорания газа в камеру 3. Затем газы проходят через подовые отверстия 4, радиальные 5, вертикальные 6 каналы и подовые вылеты 7 в верхнюю камеру 8 и трубу 9.

Топка полностью размещена в толще стены, а подводка газа, воды и воздуха с контрольной и регулировочной аппаратурой размещены в приямке подвального этажа. Каждая топка оборудована двумя газовыми горелками с самостоятельными камерами сгорания 1 (рис. 30) и вылетами 2 в печную камеру 3.

Для более равномерного распределения топочных газов в печной камере вертикальные каналы в кладке стены раздвинуты относительно оси форсунок. Через смотровое отверстие 4 контролируют температуру топочных газов. Подвальный прямок перекрывают решетчатым колпаком 5.

Длину и температуру факела в топке и в загрузке капселяй с фарфором регулируют распылением воды форсункой и монтиро-

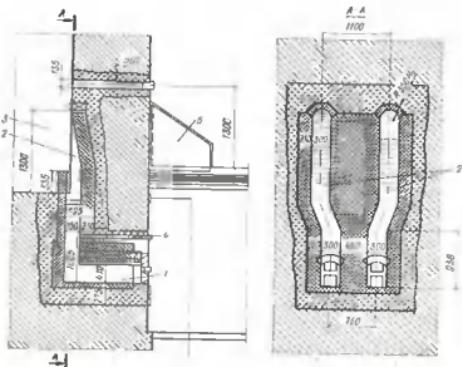


Рис. 30. Конструкция газовой топки

войкой в корпусе стандартной газовой горелкой ГНП-6. Регулирование работы горелок подачей распыленной воды начинается с переходом от окислительного периода обжига к восстановительному и продолжается до конца обжига. Расход воды на один цикл обжига около 12 м³.

Расход газа на один цикл обжига, продолжающийся 32 ч, составляет 23–24 тыс. м³.

Удельный расход условного топлина на 1 м³ печного объема 173 кг.

Удельный расход на 1 т загрузки (брutto) фарфор – кансели) камеры первого этажа 426 кг/т

Удельный расход топлина на 1 т обожженного (глазурованного) фарфора 2132 кг/т.

Удельный расход на 1 т готовой продукции (за исключением отходов — боя, брака) 2582 кг/т.

Ассортимент обжигаемых изделий: чайники, пивные, тарелки, чаши, кружки.

Загрузка печной камеры первого этажа составляет около 45–53 тыс. изделий, или 10–13 т.

Масса капселяй в камере первого этажа 52–55 т.

Температурное поле в нижней камере под контролем пиromетров: в верхней части 1355°C, в нижней 1340°C, в средней части и в периферийном кругу капселяй 1350°C.

Температура предварительного обжига фарфора в верхней камере 800–1000°C на высоте 0,5 м от уровня пода. Средняя продол-

Таблица 4. Основные размеры и эксплуатационные характеристики двухэтажных горнов

| Основные размеры и эксплуатационные характеристики | Горн с четырьмя топками в нижней и верхней камерах, работающим на дровах | Горн с четырьмя топками в нижней и верхней камерах, работающим на газе | Горн работающий на природном газе |
|--|--|--|-----------------------------------|
| Диаметр пода первого этажа, м | 7,9 | 7 | 7,48 |
| Объем камеры первого этажа, м ³ | 132 | 124,5 | 154 |
| Диаметр пода второго этажа, м | 8,1 | 7,72 | 7,6 |
| Объем камеры второго этажа, м ³ | 165 | 188 | 165 |
| Число топок | 8 | 8 | 10 |
| Живое сечение (суммарное) колосниковых решеток, м ² | 2,1 | | |
| Объем топочного пространства, м ³ | 12,6 | 21 | 3 |
| Конечная температура обжига пилотной камеры (средняя), °С | 1350 | 1350 | 1350 |
| Расход условного топлина на 1 м ³ полноты камеры, т | 0,18 | — | 0,173 |

жительность обжига глазурованного фарфора в двухэтажном горне № 1 около 32 ч (не считая охлаждения).

Тепловой баланс двухэтажного горна составлен с учетом обжига полного фарфора до температуры 1350 °С в камере первого этажа и предварительного обжига в камере второго этажа до температуры 900 °С с учетом несущих газов, уходящих из первой камеры (табл. 4).

Данные сводного теплового баланса двухэтажного горна № 1 приведены в табл. 5.

Принимая расход теплоты по статьям 1, 2, 3, 5, 6, 7 независимым от конструкции и работы печи, тепловой коэффициент ее полезного действия будет равен:

$$0.15 + 11.28 - 3.53 - 0.18 - 6.73 - 1.18 = 23\%.$$

Таблица 5. Сводный тепловой баланс двухэтажного горна № 1, работающего на природном газе

| Статьи баланса | Количество теплоты | |
|---|--------------------|------------|
| | кДж | % |
| Приход теплоты | | |
| 1. Химическая энергия топлива | 821 235 810 | 98,9 |
| 2. Физическая теплота топлива | 58 660 | 0,01 |
| 3. То же, выносимое с воздухом | 6 909 310 | 0,9 |
| 4. Физическая теплота загруженной фарфора канселей | 284 920 | 0,03 |
| | 1 135 490 | 0,16 |
| Итого | 829 624 190 | 100 |
| Расход теплоты | | |
| 1. На испарение влаги изделий | 3 754 240 | 0,45 |
| 2. На нагрев канселей | 93 680 020 | 11,28 |
| 3. На обжиг изделий | 29 091 170 | 3,53 |
| 4. На испарение влаги, выдываемой для снижения температуры | 9 519 680 | 1,16 |
| 5. На испарение влаги изделий в чистильной камере | 1 575 440 | 0,18 |
| 6. На нагрев канселей и обжиг их в чистильной камере (второй этаж) | 56 866 680 | 6,73 |
| 7. На чистильный обжиг изделий | 8 974 980 | 1,18 |
| 8. Потери с уходящими газами и с загрязненным воздухом (при охлаждении) | 515 579 500 | 62,45 |
| 9. Потери в окружающую среду через влагу | 63 935 210 | 7,36 |
| 10. Потери с выбрасываемыми изделиями и канселелями | 10 635 340 | 1,36 |
| 11. Прочие потери и расходы | 35 811 930 | 4,32 |
| Итого | 829 624 190 | 100 |

ПЕЧИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С ВЫКАТНЫМ ПОДОМ

Печи периодического действия с выкатным подом применяют в производстве крупногабаритных изделий с большой производительностью и специальными режимами обжига, например оболочек высоковольтных изоляторов, керамических ванн, крупногабаритного кислотоупорного фарфора. Эти печи отличаются от других печей периодического действия удобством загрузки и выгрузки изделий на выдвижутом из печи поду (футерованной платформе) в нормальных атмосферных условиях и с использованием необходимых подвижно-транспортных устройств.

Печь, предназначенная для обжига крупногабаритных изделий, имеет прямоугольную камеру длиной 5–6 м, шириной 2,5–3 м, оборудованную топками I (рис. 31) и двумя вагонетками II, образующими футерованный очагупором под печи. В топках устанавливают форсунки для мазута или горелки при использовании природного газа. Конструкция вагонеток печи аналогична конструкции вагонет-

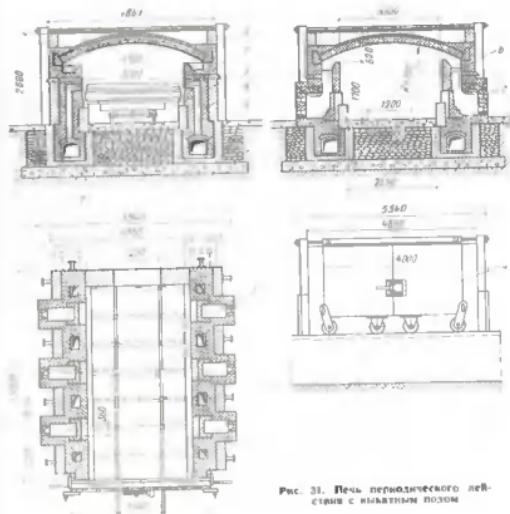


Рис. 31. Печь периодического действия с выкатным подом

гок крупной туннельной печи. Вагонетки камеры печи с выкатным подом уплотняют со стенами печной камеры песочными затирочками 3. Вагонетки с загруженными изделиями задвигают в камеру через раздвижную двухстворчатую дверь 4, футерованную изнутри плитами и теплоизолирующими кашниками. Камера печи герметична сводом, опирающимся за пределами точечных вылетов на стены печи, связанные каркасом из балок 5. Пламя из топок 1 через перевальные стены 6 поднимается под свод, а затем опускается на под вагонеток, омывая загруженные на них изделия. Отработанные газы удаляются через расположенные в стенах печи выхлести 7, вертикальные 8 и горизонтальные 9 каналы, идущие к дымососу.

Так как топки и каналы для удаления дымовых газов расположены в стенах печи, то нет никаких ограничений для увеличения ее длины и числа выдвижных платформ. Длинную камеру при большом

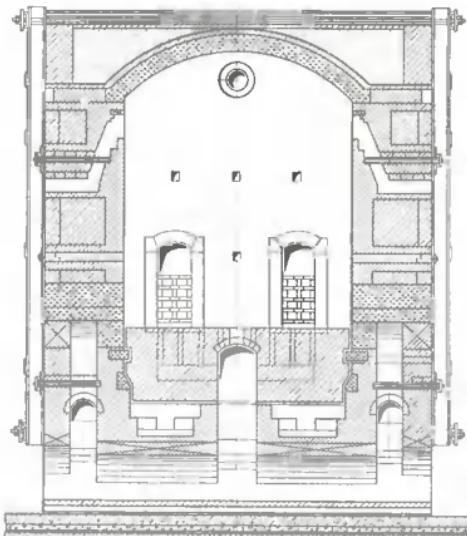


Рис. 32 Однокамерная печь с выкатным подом для обжига высоковольтных изоляторов

объеме производства, целесообразно разделять перегородкой на две части, работающие поочередно. Такая очередность работы дает более равномерный ритм производства в смежных технологических процессах.

Однокамерная печь с выкатным подом (рис. 32) имеет более сложную конструкцию и применяется для обжига высоковольтных изоляторов высотой до 3 м. Она имеет дополнительные топки в торцовой стене и в откатных дверях печи.

КОЛЬЦЕВЫЕ И МНОГОКАМЕРНЫЕ ПЕЧИ

Важным этапом в развитии печной техники был переход от печей периодического действия к кольцевым печа姆 в производстве строительного кирпича и черепицы и к многокамерным газовым печа姆 в производстве огнеупоров и кислотупоров. Эти печи, разные по конструкции, работают с непрерывной загрузкой и разгрузкой печного канала или камер и перемещением по кольцевой схеме всех стадий теплообработки: подогрева, обжига и охлаждения при неодинаковой садке изделий.

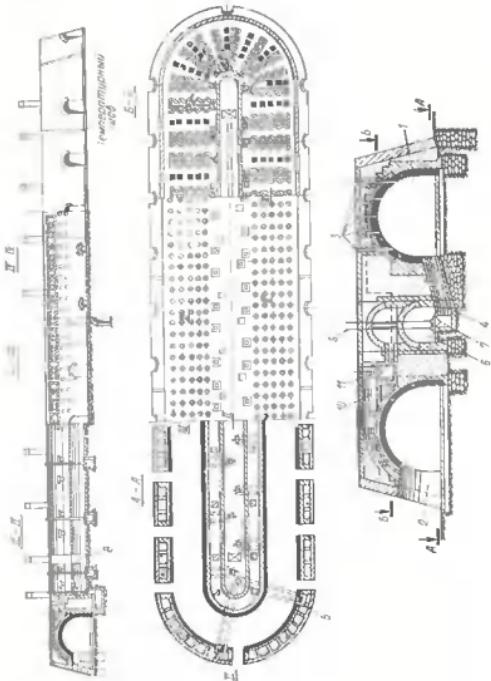
Канал туннельной печи разделен на три стабильные зоны, через которые проходят изделия на вагонетках. В кольцевых и многоярусных печах, наоборот, неподвижна садка изделий, а перемещаются зоны подогрева, обжига и охлаждения путем перевода подачи топлива, отбора дымовых газов и подачи воздуха для охлаждения на последующие позиции печного канала.

Основные конструктивные элементы кольцевых печей были разработаны немецким ученым Гофманом в 1858 г., и с незначительными изменениями повторялись в последующих вариантах. Канал 1 печи обычно состоит из двух прямых участков (рис. 33), соединяющихся полукруглыми участками 2. Печной канал условно, без перегородок, разделен на камеры, каждая длиной около 5 м в соответствии с числом ходков 3 для загрузки сырца и выгрузки кирпича после обжига. Размеры печного канала: ширина 2,5–6 м, высота 2–3,5 м, длина до 200 м.

При большой длине канала обжиг кирпича проводят в два или три самостоятельных цикла, состоящих из последовательных процессов, выполняемых в отдельных камерах: загрузка, подогрев, обжиг, охлаждение, выгрузка. Пустые камеры используют для подачи и откатки вагонеток с кирпичом.

Зона подогрева отделяется от камеры на загрузку сырца картонным щитом по сечению канала под трубочками (дымовые очелки) 4, устроенным в своде для загрузки топлива. После отделения щитом очередной загруженной камеры от рабочей зоны щит на предыдущей камере разрывается крючком через обжиговую трубочку, и открывается конический любер 10 для отбора дыма через каналы 11 в общий боров 9. Таким образом, зона подогрева, а затем и зоны обжига и охлаждения перемещаются на одну позицию.

Рис. 33. Колыцевая печь
1 — подающий канал; 2 — садка; 3 — подающий канал для топлива; 4 — аппарат для топки; 5 — каналы охлаждения; 6 — горячий шибер; 7 — засыпка; 8 — каналы для отвода тепла; 9 — конус; 10 — первая засыпка; 11 — вторая засыпка; 12 — третья засыпка; 13 — четвертая засыпка



Продолжительность промежутка между включениями очередных камер и их длиной определяются скоростью перемещения цикла обжига (скорость огня) и производительность печи.

Кольцевые печи работают на дробленом твердом топливе, которое подают через каналы 5 в своде печи непосредственно в сажу кирпича. Через раскаленную сажу проходит горячий воздух, получаемый при охлаждении кирпича, за счет чего обеспечивается полное сгорание топлива. В сводовые каналы вставлены чугунные трубы диаметром 150—200 мм с крышками. Ряды труб размещены с шагом по длине канала 0,9—1,5 м и с шагом трубок в рядах 0,8—0,9 м. Засыпку топлива через трубочки производят приточную или с помощью автоматических питателей (муар-аппаратов). Перестановка аппаратов при переходе на загрузку следующего ряда трубок, загрузка питателей топливом и присоединение их к проходящей вдоль печи трансмиссии, а также переналадка аппаратов при изменении сорта топлива усложняют использование автоматических питателей.

При охлаждении кирпича используют большие воздушные щели для сжигания топлива, поэтому часть горячего воздуха отбирается через трубочки, каналы 8 в своде, конусный шибер 7, паровой бор 6 и подается на досушивание кирпича в камеры подогрева или в сушилки.

Производительность кольцевых печей определяется в зависимости от длины и площади сечения канала, числа камер на загрузку, выгрузке и ремонт, числа одновременных циклов (огней), скорости огня и плотности сажки кирпича на 1 м³ обжигаемого канала.

Продолжительность обжига находится в обратной зависимости от плотности сажки, так как с увеличением плотности сажки повышается ее гидравлическое сопротивление и ухудшаются условия теплообмена. При плотной сажке (свыше 4300 пт. кирпича на 1 м³ печного канала) скорость огня составляла 17—18 м/с, а съем — 1130—1250 пт. кирпича с 1 м³ печного канала в месяц.

Применение разреженной сажки (190—200 пт №⁰) резко снижает сопротивление нижней части сажки, повышает скорость циркуляции газов и, применяя рассредоточенный их отбор через несколько конусов (шиберов), снижает продолжительность обжига со 144 до 54 ч, а расход топлива до 67% от расхода при интенсивных методах обжига. Низкая температура обжига строительного кирпича и не высокие требования к его физико-механическим свойствам обусловили простую конструкцию кольцевых печей, их незначительную металлоемкость, минимальные капитальныеложения при постройке таких печей. Низкие требования к качеству твердого топлива, малые потери тепла и высокий тепловой коэффициент полезного действия кольцевых печей дают соответствующее снижение стоимости обжига.

Крупным недостатком кольцевых печей, имеющим в современных условиях особую значимость, является большой удельный расход рабочей силы по загрузке топлива, загрузке и выгрузке кирпича в печном канале в тяжелых условиях.

Способ ускоренного обжига с высокими скоростями газовых потоков разработан для блокированной работы кольцевой печи с сушилкой. Все топливо, необходимое для обжига и сушки кирпича, по этому способу сжигают в кольцевой печи, а сушку кирпича производят продуктами сжигания этого топлива, которые отбирают из последней камеры зоны подогрева. Печь работает по следующему графику: садка — одна камера, зона сушки и подогрева — две камеры, зона обжига — полторы камеры, зона медленного остыния — одна камера, зона охлаждения — две камеры, выгрузка — полторы камеры. Общий тепловой баланс кольцевой печи и сушки приведен в табл. 6.

Таблица 6. Общий тепловой баланс кольцевой печи и сушки

| Статьи баланса | % | Статьи баланса | % |
|--|------|--|------|
| Приход теплоты | | | |
| 1. Химическая энергия топлива, запрессованного в кирпич (апель, подмосковного угля) | 50,3 | Расход теплоты | |
| 2. Физическая теплота топлива, забрасываемого через трубочки | 39,3 | 1. На испарение влаги | 42 |
| 3. Химическая энергия топлива, израсходованного при производстве пара для прогрева сырья | 10,4 | 2. На химические реакции | 13,7 |
| Всего | 100 | 3. С уходящими газами | 29,8 |
| | | 4. С выхлопным из печи кирпичом | 0,7 |
| | | 5. Потери в окружающую среду в результате неизвестного горения, потери пара в газоизмещателе и неучтенные потери | 13,8 |
| | | Всего | 100 |

Перевод кольцевых печей с твердого топлива на газ выполняют в наиболее простом варианте с помощью устройства переносных газовых горелок, расположенных по месту трубочек, используемых для загрузки твердого топлива и присоединяемых к газопроводу, проходящему по оси печи.

В газифицированной кольцевой печи улучшаются условия труда рабочих на загрузке и разгрузке камер, улучшается регулирование обжига и качества выпускаемой продукции. Все недостатки, связанные с перемещением зоны обжига, и затруднения, возникающие при включении кольцевых печей в современные механизированные линии, остаются и при попытках усовершенствования и реконструкции кольцевых печей. Поэтому при благоприятных предпосыпках — наличии жидкого топлива или газа и сырья, обеспечивающего устойчивую садку кирпича на вагонетки туннельной печи в процессе обжига, кольцевые печи заменяются туннельными.

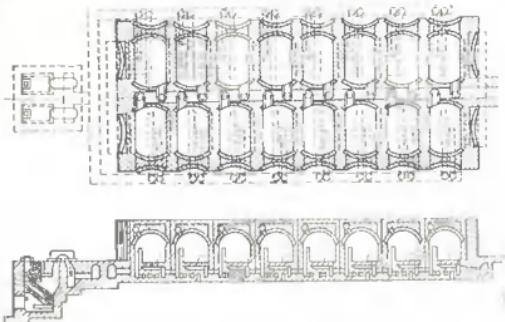
Многокамерные газовые печи (рис. 34) работают, как и кольцевые, с использованием тепла дымовых газов на предварительный

подогрев изделий, а горячего воздуха, получающегося при охлаждении изделий, на сжигание топлива. Многокамерные печи Менделеева работали на генераторном газе из газогенераторов, установленных в одном блоке с печью, что позволяло обходиться без длинных газопроводов и газоочистки.

Прямоугольные камеры блокированы в два ряда по кольцевому принципу с помощью каналов, заложенных в общих промежуточных стенах. Эти каналы предназначены для передачи продуктов сжигания топлива из одной камеры в другую в период обжига или воздуха при охлаждении изделий (см. рис. 34).

Газы, поступающие из предшествующей камеры, направляются перегородкой под свод, а затем исходящим потоком омыают изделия и проходят через канализированный под сводом канал в стене в следующую камеру. Каждая камера в свою очередь становится последней в потоке дымовых газов. В ней имеется бортик сшибром для отвода дыма через общий коллектор в дымосос или в трубу. Газ из общего газопровода подается через регулирующий вентиль в очередную камеру по каналу, заложенному в поддув, перенаправленному потоку горячего воздуха. На охлаждение изделий требуется более воздуха, чем на сжигание топлива, и часть воздуха с приемлемой температурой отбирается через трубы в снаружи камер и направляется в сушки.

Высокотемпературные печи для обжига огнеупоров переводили с генераторного газа на более стабильное топливо — природный газ или мазут. В массовом производстве изделий по стабильному режиму многокамерные печи заменили туннельными. За многокамерными газовыми печами обычно сохраняется пестрый размах в режимах



мам обжига ассортимент изделий. В этих условиях в каждой камере можно по показателям приборов в известных пределах изменять режим обжига применительно к загруженным в нее изделиям.

Многокамерные печи, построенные в разное время в основном для обжига оgneупоров и кислотоупоров, отличались разными характеристиками.

| | |
|---|---------|
| Число камер | 12—36 |
| Объем камеры, м ³ | 43—153 |
| Длина " " | 6,5—8,8 |
| Ширина " " | 2,5—5,2 |
| Высота " " | 2—2,4 |
| Число одновременно выполняемых циклов («огней») | 2—3 |
| Удельный расход условного топлива, т | 280—300 |

По расходу топлива многокамерные печи занимают промежуточное место между печами периодического действия с расходом 450—550 кг т и туннельными печами с расходом 160—200 кг т, работающими по режиму обжига в разных условиях.

§ 19. ПЕЧИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

В 1840 г. Р. А. Иорд предложил, а в 1853 г. построил в Дании туннельную печь для обжига кирпича на передвигающихся вагонетках, которая не получила практического применения вследствие нагрева бокус и других частей вагонетки печными газами, проникавшими в зону обжига через зазоры между футеркой вагонетки и стенами печного канала. Лишь в 1877 г., после получения Бюком патента на устройство печочных затворов у бортов вагонетки, туннельные печи получают непрерывно расширяющееся пространение в производстве оgneупоров и тонкой керамики, чугуяторов.

Туннельные печи состоят из канала, через который перемещаются с заданным ритмом изделия на вагонетках или платформах настырь печных газов.

На современных отечественных и зарубежных заводах получили широкое распространение туннельные печи с прямым каналом для непосредственного или муфельного нагрева разнообразных керамических изделий.

Печи с колцевыми и П-образными каналами не применяют в современных механизированных линиях, а те печи, которые были построены ранее, заменяют печами с прямым каналом. Туннельные печи с электронагревом не используют на заводах для масового обжига изделий вследствие высокой стоимости электроэнергии. Малогабаритные высокотемпературные электрические туннель-

ные печи применяют в научно-исследовательских институтах для обжига изделий, выпускаемых в небольших количествах.

Туннельная печь в соответствии с выполняемыми физико-химическими процессами разделяют на три зоны: зону подогрева изделий, зону спекания (топочную) и зону охлаждения.

В зоне подогрева изделия освобождаются от оставшихся после сушки небольших количеств влаги, а затем в зависимости от состава керамической массы происходит разложение некоторых ее компонентов, например глины, каолина, а также известняка, магнезита, доломита и других соединений. Эти процессы заканчиваются при нагревании примерно до температуры 800—950° С и сопровождаются начальными процессами твердофазного скелания и образования звуковых силикатных расплавов. Последующие процессы, обычно сочетающиеся с образованием стекловидной и новых кристаллических фаз, протекают в топочной зоне.

Разграничение зоны подогрева и зоны спекания является условным, так как в целях выравнивания температуры верхних и нижних ярусов обжигаемых изделий в зоне подогрева некоторых печей устанавливаются низкие щелевые толики небольшой мощности.

У входа в зону подогрева устраивают загрузочную шлюзовую камеру, в которой очередную вагонетку отделяют от окружающей среды с помощью двух поочередно поднимаемых и опускающихся щитов. В некоторых печах вместо щитов устраивают гидравлическую запасу из воздуха, поступающего из зоны охлаждения через щели в своде и стенах печи (рис. 35). Давление воздуха, подаваемого запасой у входа в туннель, должно быть достаточным для предотвращения подсоса атмосферного воздуха. Температура воздуха запасы, частично выходящего из туннеля, должна быть безопасной для рабочих, занятых на подаче вагонеток.

Поезд вагонеток периодически перемещают гидравлическим толкателем на одну позицию при задании расчетном усилии. При возникновении завала продукции в печном канале или при других препятствиях срабатывает предохранительный клапан гидравлической системы, и толкатель выключается, чем предотвращается повреждение вагонеток и других устройств.

Гидропривод толкателя обеспечивает бесступенчатое регулирование скорости перемещения вагонеток, что вместе с отмеченными выше преимуществами привело к замене механических толкателей гидравлическими. Количество теплоты, поступающей из зоны подогрева из топочной зоны, определяется разностью между генплотом от

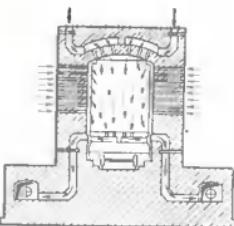


Рис. 35. Воздушная запаса с расположенным вдуванием подогрева воздуха в зону подогрева

сжигания топлива и расходом теплоты на нагрев изделий и теплопотери в топочной зоне.

Для интенсификации теплообмена и регулирования температурной кривой в конструкции зоны подогрева предусматривают: распределенный отбор дымовых газов, подачу горячего воздуха из зоны охлаждения через гидравлические завесы, а также устройство вентиляторов и дополнительных щелевых топок с каналами в стенах и в своде для рециркуляции печных газов. Использование упомянутых устройств, проверенных при эксплуатации печей, позволяет снизить перепад температур по высоте садки изделий на вагонетках и более точно разграничить участки с окислительной и восстановительной атмосферой.

В топочной зоне изделия нагреваются по заданному режиму сжигания топлива в топках, оборудованных форсунками или горелками. В последние годы в связи с перебоями в снабжении топливом на зарубежных заводах (США) расширяется использование горелок комбинированного типа с быстрым переключением на распыление жидкого топлива и на сжигание газа. В этом и в другом варианте сжигания топлива начинается в компактных топочных камерах, размещенных в кладке стены, и заканчивается в печном канале.

В зависимости от степени смешивания газа или распыленного жидкого топлива с воздухом процесс сжигания можно осуществлять по двум типичным схемам. В печах с большим сечением печного канала, используемых для обжига огнеупоров и грубой строительной керамики, на качество которых не влияет неоднородность состава печных газов, применяют горелки с частичным смешиванием топлива с воздухом, причем большая часть топлива сжигается в печном канале. При этом отдача тепла изделиям компенсируется нагоранием топлива в садке изделий и таким образом достигается более равномерный нагрев изделий, расположенных вблизи топочных вышестоящих на некотором удалении от них.

Обжиг тонкой керамики при недостаточном смешивании топлива и воздуха происходит в перемещающихся окислительной и восстановительной среде и сопровождается значительным выходом некондиционной продукции из-за нестабильности окраски изделий, дефектов глазури и других отклонений от нормативов. Поэтому обжиг тонкой керамики производят в туннельных печах с небольшим сечением канала, оборудованными топками с достаточным смешением топлива и воздуха. В этих условиях быстро завершается сжигание топлива и как следствие такого сжигания образуется короткий факел пламени с наибольшей температурой вблизи топок и резко поникающейся в результате теплоотдачи, не восполняемой завершающим сжиганием топлива в садке изделий. При обжиге тонкой керамики пламя из щелевых топок обычно направляется в канализированный под вагонетки, собранный из термостойких прочных карбонитовых стоеч и плит.

При обжиге огнеупоров канализированный под из-за тяжелой загрузки вагонетки не устраивается, и перепад температур между

верхними и нижними рядами садки устраниется интенсивным взаимным излучением изделий при высоких температурах обжига и большой длительностью обжига. Использованием в топках горячего воздуха, подаваемого из зоны охлаждения керамическими инжекторами, достигается повышение температуры обжига и существенное снижение расхода топлива.

ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ НАГРЕВОМ ИЗДЕЛИЯ

Туннельные печи с непосредственным нагревом изделий являются основными тепловыми установками для обжига огнеупоров и кирпичупоров, грубой строительной керамики и большей части технической, бытовой и строительной тонкой керамики. Конструктивные особенности печей, условия эксплуатации и удельные расходы топлива зависят от весьма разнообразного ассортимента и назначения обжигаемой керамики. Режимы обжига некоторых огнеупорных материалов отличаются высокими конечными температурами в пределах 1450–1650°С и продолжительностью обжига в пределах несколкých суток.

Высокая производительность печей, используемых в массовом производстве огнеупоров, в основном обуславливается объемом печного канала, а также высокой плотностью садки изделий на вагонетках до 850 кг м³ садки.

Обжиг шамотных, динасовых, магнезитовых, высокоглиноземистых и хромомагнезитовых огнеупоров осуществляют в окислительной среде с избытком воздуха в топочной зоне 1,2–2; в зоне подогрева вследствие подсосов воздуха из подвагонеточного канала избыток воздуха может достигать двух-, трехкратного увеличения по отношению к теоретически необходимому расходу. Высокие температуры обжига требуют применения высокогнеупорных материалов для кладки стен, сводов и топок, а также массивной футеровки и теплоизоляции пода вагонеток. Большая длина зоны подогрева в печах для обжига огнеупоров и крупногабаритных изделий и соответствующее сопротивление садки обуславливают повышенное разжение в печи и повышают требования к уплотнению в торцах вагонеток и в песочных затворах.

Подъем температуры в зоне подогрева регулируют распределенным отбором дымовых газов через каналы в стенах печи непосредственно над подом вагонеток. Каналы имеют шиберы, с помощью которых можно регулировать отбор дыма каждым каналом от полного открытия до перекрытия на соответствующих позициях зоны подогрева. В зависимости от размеров и термостойкости изделий, содержащих пластичные материалы и влаги в изделиях их нагревают с различным временем подъемом температуры. Вагонетку с изделиями подают в печь через загрузочную камеру. Из нее гидравлическим толкателем через заданные интервалы вагонетка перемещается в туннель. Одновременно перемещается весь поезд на длину одной вагонетки.

Таким образом выполняется непрерывное (точнее, пульсирующее) движение изделий в противотоке с печными газами в зоне подогрева, топочной зоне и зоне охлаждения. Как соотношение длины отдельных зон, так и продолжительность нагрева изделий и их охлаждение определяются температурным режимом, который устанавливается в соответствии с размерами изделий, их влажностью и составом керамической массы.

Путем изысканий в лабораторных печах определяется минимальная продолжительность нагрева изделий и их охлаждения, необходимого для получения изделий заданных размеров высокого качества при наиболее благоприятных условиях теплообмена. В промышленных туннельных печах высокая производительность в одном агрегате достигается при увеличении площади сечения печеного канала до 6 м^2 . В этих условиях оптимальный обжиг не может однозначно создаваться во всех сечениях загрузки вагонеток. Поэтому производительность печей рассчитывается по продолжительности нагрева и охлаждения отстающей части садки и существенно отличается от оптимального обжига печей, работающих в лабораторных условиях.

Иследовательские институты и конструкторские бюро работают над изысканием методов и конструктивных улучшений, обеспечивающих более равномерный нагрев изделий и их охлаждение на всех этапах тепловой обработки. При неблагоприятном сочетании характеристики изделий (из крупных габаритов, недостаточная паропроводность кипиляров и др.) подъем температуры в зоне подогрева производится по кривой 2 (рис. 3б), для чего открывают шиберы в каналах, которые отбирают часть печных газов и таким образом снижают подачу тепла на первых позициях печи.

В производстве огнеупорного шамотного кирпича применяют туннельные печи, комбинированные с туннельными сушилками. Кирпич, отпрессованный из порошкообразной массы, укладывают непосредственно на вагонетки туннельной печи, последовательно проходит через канал туннельной сушки и зону подогрева печи. При небольшой влажности кирпича полусухого прессования (около 8%) в туннельной сушке после удаления влаги температура кирпича можно довести до $300 - 400^\circ\text{C}$, что позволяет фиксировать подъем температуры в зоне подогрева по кривой 1 или 3, а также форсировать режим охлаждения (кривые 4, 5). Туннельные сушки обогревают горячим воздухом из зоны охлаждения туннельной печи и размещают на одной линии с печью или на пути возврата вагонеток.

По первому варианту получают несложную конструкцию устройства для передачи вагонетки из сушки в зону подогрева печи, но длина пролета цеха для печи и сушки достигает большой величины. По второму варианту длину пролета снижают, но уложняют конструкцию транспортной тележки для подачи вагонеток с горячей садкой в зону подогрева туннельной печи.

Высокие температуры обжига огнеупоров обусловлены большой объем горячего воздуха, получающегося при охлаждении обожженных огнеупоров. Система распределенности отбора воздуха из

зоны охлаждения туннельной печи дает возможность обеспечить сушилку теплонесущим заданных параметров, а топки горячим воздухом с помощью керамических инжекторов.

Эффективное использование воздуха из зоны охлаждения расширяет температурный диапазон применения туннельных печей и дает существенное снижение расхода топлива на заводах огнеупоров и других материалов. В производстве грубой строительной керамики туннельные печи применяют в производстве кирпича, чистотных блоков, дренажных и канализационных труб из керамических масс, не дающих деформаций под нагрузкой при конечной температуре обжига.

При деформации низких рядов кирпича или блоков садка на вагонетке разваливается, и в результате возникают простон в работе печи. Поэтому на заводах, использующих местные глины с узким интервалом температуры спекания, кирпич обжигают в кольцевых и других печах с неподвижной садкой.

В новые конструкции туннельных печей для обжига грубой строительной керамики внесены следующие существенные изменения: снижение высоты садки на вагонетках, расширение печеного канала с 3 м до 4,5—6 м, чем избыток компенсируется уменьшением производительности печи от уменьшения высоты садки на вагонетках, перекрытие канала плоским сводом, замена топок, размещаемых в стенах печи, на топки в своде с автоматическим регулированием длины факела.

В проектных и научно-исследовательских институтах, занимающихся силикатными материалами, проводят работы по увеличению производительности печей в двух направлениях: в направлении интенсификации теплообмена и разработки ускоренных режимов теплобаланса и увеличения объемов печных камер или каналов.

В туннельных печах для обжига тонкой керамики увеличение производительности туннельных печей достигается в основном за счет разработки ускоренных режимов обжига. Размеры печеного канала в связи с разнообразием ассортимента изделий и специфическими условиями загрузки изделий на вагонетках стабилизировались в пределах: длина до 100 м и более, ширина 1,3—2,2 м, высота садки до 2,5 м.

В зависимости от размеров изделий их загружают в шамотные или карборундовые капсели (рис. 37), устанавливаемые на канализированный под вагонетки. Канализированный под собирают из двутавровых карборундовых стоеч 2 и плит 3. Через соответственно ориентированные каналы пода топочных газов подают из вспомогательных щелевых точек, а затем отбирают через каналы, расположенные в стенах зоны подогрева. Основные топки 5 размещают над стыками вагонеток и подают продукты сжигания тоццина в межсадочные камеры 1. Капсели нагревают при плотной установке (для большей устойчивости) излучением и конвективным теплообменом с потоками газов, циркулирующих в каналах пода вагонетки и между садкой, стенками и сводом туннеля. Тепло от стенок кап-

сей с передается путем излучения загруженным в них изделиям по схеме муфельного нагрева, но печи для обжига относят к рассматриваемой группе, так как топочные газы циркулируют в садке вагонеток.

Другой тип садки — на этажерке из карборундовых плит, отличающихся высокой прочностью, термостойкостью и экономической эффективностью при условии высокой их обрачиваемости — свыше 100 циклов обжига. Зарубежные заводы тонкой керамики используют фасонный карборундовый приспособление, изготавливаемый на специализированных заводах применительно к запросам этой отрасли.

Обжиг изделий на этажерках (рис. 38) протекает при непосредственном теплособмене с газами интенсивнее, чем в капселях, и широко используется в производстве санитарно-строительного кислотоупорного, электроизоляционного, хозяйственного фарфора и фаянса.

Ширина туннельных печей для обжига на этажерках лимитируется длиной руки при загрузке вагонеток в пределах 1—1,3 м, так

как этот процесс не поддается механизации. Поэтому в современных печах с большим сечением канала применяют комбинированную садку. Средняя часть вагонетки имеет постоянную этажерку, а по бокам уста-



Рис. 36. Схема регулирования кривой обжига в туннельной печи

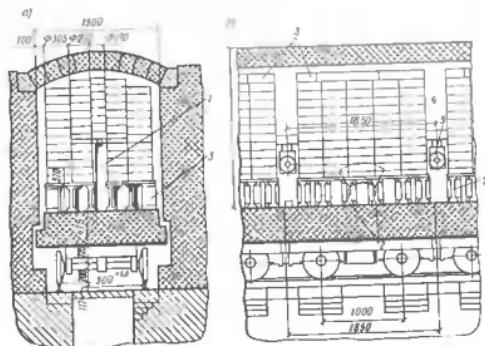


Рис. 37. Капсельная садка фарфора на вагонетку
а — вид с торца, в — вид сбоку, 1 — продольный канал, 2 — стойки, 3 — плиты, 4 — низкотемпературная сварочная камера, 5 — топка

навливают кансели для загрузки мелкой электроизоляционной керамики или гардер и бледен, огливающихся из-за низкого коэффициента использования печного объема при обжиге на этажерках.

В печах для обжига высоковольтных глазурованных изоляторов, хозяйственного и санитарного фарфора к процессу сжигания глины предъявляются высокие требования в отношении скорости нагрева и состава печных газов в разные периоды обжига. Продолжительность обжига фарфоровых изделий в основном определяется их размерами, что очевидно подтверждается единовременным обжигом крупногабаритных высоковольтных фарфоровых оболочек и фарфоровых чашек, изготавливаемых из близких по составу и температурам обжига керамических масс.

Обжиг крупных изоляторов (оболочек высотой 2,5 м), освоенный впервые в мировой практике в печи с размером канала $141 \times 2,5 \times 3,28$ м, спроектированной Всесоюзным научно-исследовательским институтом электротехники (ВНИИЭК), продолжается около 160 ч. Обжиг фарфоровых чашек толщиной стенки 1,5—3 мм и недавно освоенный туннельной печи размером канала $28,4 \times 0,98$ м и одновременной загрузкой вагонеток продолжается 3—4 ч. Чайные и столовые сервисы (с толщиной стенок некоторых изделий до 8—10 мм) обжигаются в туннельных печах размером канала $93 \times 1,5 \times 1,7$ м в течение 28—32 ч.

Основной недостаток издавнейшей печи — неравномерность температур по высоте садки изделий в зоне подогрева. Эта температурная неравномерность вызвана расслоением горизонтального потока газов. Расслоение потока и отставание нагрева нижней части садки усугубляются подсосом атмосферного воздуха из подвагонеточного канала через уплотнения в стыке вагонеток и через несанкционированные затворы. В зависимости от длины зоны подогрева, а следовательно и необходимого разрежения, коэффициент избытка воздуха продукта горения возрастает до 2—3, а разница температур под сводом и у пода вагонетки до 200—300° С. В этих условиях продолжительность нагрева изделий определяется инженерной температурой с соответствующим увеличением продолжительности обжига в целом.

В последние годы при сооружении новых и реконструкции действующих печен для устранения перенада температур в зоне подогрева вводят конструктивные изменения посредством устройства гид-

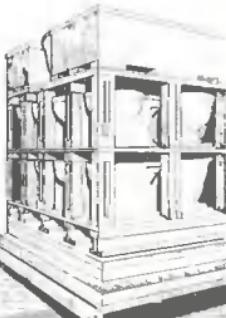


Рис. 38. Керамическая этажерка для загрузки вагонеток санитарными фарфоровыми изделиями

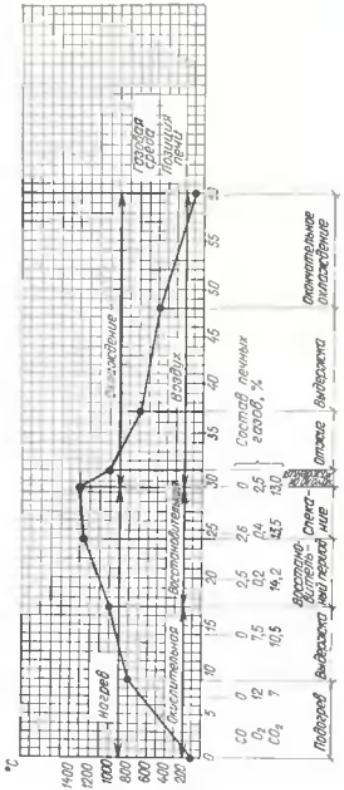
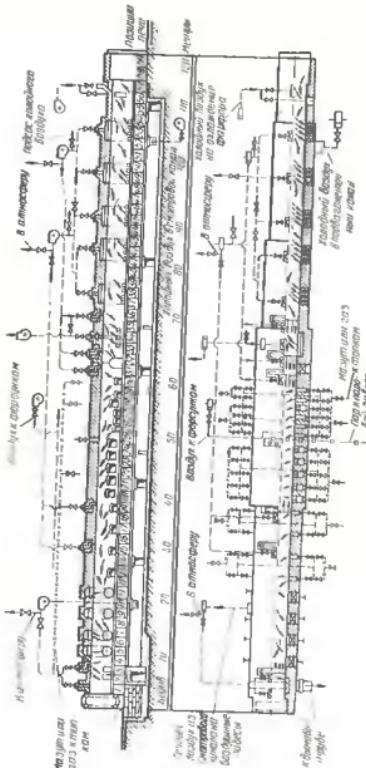


Рис. 39. Приженный режим обжига высокомольщих изоглазиров



PAC, 40. CXCHEM. ANNEXE 2.2.202 B FIGURE

ральических завес путем подачи горячего воздуха из зоны подогрева в канализированный под вагонетки или в промежутки между садкой над стыками смежных вагонеток; установки в кладке стен центрилаторов из жароупорной стали для рециркуляции и перемешивания печных газов; устройство дополнительных щелевых топок инжекционного типа с попутной рециркуляцией газов основного потока; сооружения паровой завесы для стабилизации температуры в восстановительной зоне.

Горячий воздух из газовой завесы может подаваться в промежутки между садкой смежных вагонеток через каналы в своде и стенах или в канализированный под вагонетки с выходом в нижние ярусы садки. Воздушная завеса между восстановительной и окислительной зоной обеспечивает путем дожигания газов восстановительной зоны более четкое разграничение этих зон, а также регулирование температуры нагрева на этом участке.

Эффективность перемешивания печных газов в поперечном направлении осевыми вентиляторами из жароупорной стали подтверждалась в печах для обжига изоляторов высотой до 2 и 2,5 м. В туннельных печах размером 125 × 2,4 × 2,8 м производили обжиг изоляторов высотой до 2 м по тепловому и газовому режиму, показанному на рис. 39.

Туннельная печь размером 141,5 × 2,5 × 3,28 м имеет входной и выходной вестибюли и печной канал длиной 135 м, имеющий 54 вагонетки каждая длиной 2,5 м и соответственно 54 позиции, на которых выполняют и регулируют физико-химические и тепловые процессы. При обжиге крупногабаритных высоковольтовых изоляторов наблюдаются потери (брак) изделий из-за ведущих их под вагонетки или в результате образования трещин при неравномерном охлаждении верхней и нижней частей изолятора.

Конструктивные изменения, способствующие равномерности температурного поля по сечению печного канала, дают возможность получить высокий экономический эффект. Этой целью при проектировании печи в зоне подогрева были предусмотрены следующие устройства. Для устранения газообмена между каналом печи и помещением цеха, который снизил бы температуру садки у пода вагонетки, на позициях I и 2 печи устраивают воздушные завесы. Горячий воздух забирают из подвагонеточного канала вентилятором в печь через каналы в своде и стенах (рис. 40) и удаляют затем вместе с дымовыми газами. Давление воздуха у входа в печной канал регулируется близким к атмосферному давлением в цехе, чем и устраняется нежелательный газообмен.

Печные газы из зоны подогрева отбирают через 17 пар каналов в стенах, распределенных между позициями 2–9 печи над подом вагонеток. Отбор газов через отдельные каналы регулируетсяшиберами в соответствии с заданным для части окислительной зоны температурным режимом. Как показала практика, наличие окиси железа даже в высших сортах глины и каолинов приводит во время спекания технического фарфора к таким дефектам, как «прыщ» или

«углеродистый пузырь», а в производстве хозяйственного фарфора — еще и к нежелательной желтоватой окраске изделий. Эти дефекты устраняют после обработки изделий на позициях 17–21 восстановительной зоны печи в газовой среде с содержанием окиси углерода около 4% при температуре 950–1050°C.

Разграничение окислительной зоны от резко восстановительной, а затем от нейтральной или слабовосстановительной стабилизация температур на уровне около 1000°C осложняются на позиции 22, так как снизить температуру избытком воздуха и получить температуру избыточную площадку на позициях 17–22 без нарушения восстановительного режима невозможно. Поэтому для обеспечения оптимального газового режима на позиции 22 устроена паровая заставка (рис. 41). Вдуванием пара через спод снижается температура печных газов на этом участке без снижения оптимального содержания в них окиси углерода, тогда как изменение температуры за счет увеличения избытка воздуха привело бы к снижению содержания окиси углерода.

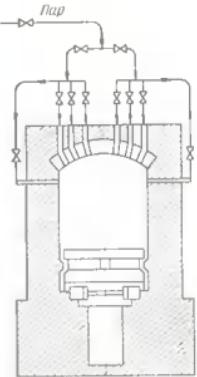


Рис. 41. Схема позиции паров в ходе восстановительной зоны

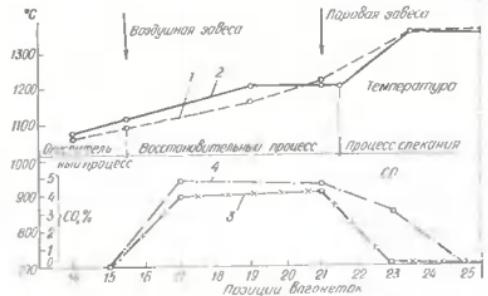


Рис. 42 Изменение температуры и содержания окиси углерода при включении и выключении паровой завесы
1 — температура в восстановительной зоне; 2 — температура в зоне восстановления пода вагонеток; 3 — содержание окиси углерода до включения паровой завесы; 4 — содержание окиси углерода после включения паровой завесы

Восстановительная зона отделяется от окислительной подачей горячего воздуха через завесы на позициях 17 и 18 печи. Роль паровой и воздушных завес в регулировании температурного режима восстановительной зоны показана на рис. 42. Три воздушные завесы на позициях 29—31 печи (см. рис. 40) предотвращают поступление газов из топочной с положительным давлением в зону охлаждения, где отбирают под разрежением горячий воздух на сушку изделий и в зоны подогрева.

Регулируемый промежуточный отбор горячего воздуха выполняют через каналы в стенах из нижней части печного канала на позициях 32—49 и из верхней части печного канала на позициях 32—43. Обогрев крупногабаритных оболочек при высоких требованиях к диэлектрическим характеристикам электротрансформаторов должны обеспечивать близкое к однозначному выполнение теплового и газового режимов в верхней и нижней частях изолятора.

В рассматриваемой печи установлены осевые вентиляторы из жароупорной стали для рециркуляции газов по вертикали.

На позициях печи 4—10 зоны подогрева установлены 7 пар вентиляторов (см. рис. 40) для работы при температурах до 800—900° С. Вентиляторы 1 (рис. 43) установлены в стенах печи и защищены от излучения садки стенкой 2. Лучшие результаты получены при отборе газов в нижней части садки и подаче их через нижние кана-лы. В зоне охлаждения на позициях печи 34—48 установлено восемь пар таких же вентиляторов (см. рис. 40), работающих с регулируе-мыми подсосом холодного воздуха для равномерного охлаждения изолиторов по заданной кривой.

В современных конструкциях туннельных печей вентиляционную систему для регулирования гидравлического режима в подвигательной камере обуют в соответствии с режимом в печном канале, чем сокращается подогрев атмосферного воздуха через уплотнения на стыках вагонеток и в песочном затворе. В зонах обжига и охлаждения с положительным давлением таким же способом снижают поступление горячего воздуха к стальным деталям вагонетки, что увеличивает срок их службы.

Техническая характеристика туннельной печи для обжига изоляторов (оболочек) высотой до 2,5 м (141,5×2,5×3,28)

| | |
|---|------|
| Длина печи, м | 141, |
| Ширина печного канала, м | 2,5 |
| Высота печного канала от пола до замка свода, м | 3 |
| Длина вагонеток, м | 2,5 |
| Число вагонеток в печи | 54 |
| То же, в юре подогрева | 18 |
| То же, в зоне сушки | 10 |
| » в зоне обжигания | 26 |
| Рабочий объем печи, м ³ | 830 |
| Наподогреваемость, единица, ч | 162 |

Малогабаритные туннельные печи используют в механизированных линиях для скоростного одностороннего обжига тонкостенных

фарфоровых изделий — чашек и блюдец. Построенные и успешно работающие при температуре 1350—1400°С печи имеют небольшой канал длиной около 30 м, шириной до 1 м и высотой около 0,3 м. По форме канала подобные печи называются щелевыми.

При малой одноярусной загрузке вагонеток эти печи могут эффективно работать при продолжительности обжига 3-4 с использованием вагонеток легкой конструкции.

В печи, спроектированной и освоенной Государственным институтом керамических изделий, в отличие от общепринятой схемы (рис. 44) вагонетки 5 возвращаются в печь по путям 12, расположенным над пеком на каркасе. В пеком канале 3 вагонетки передвигаются с помощью гидравлического толкателя 4 через загрузочную камеру по обычной для туннельных печей схеме, а на возвратных путях 12 — с помощью штанги 13, совершающей возвратно-поступательное движение. С верхних путей вагонетки опускаются на нижние, а после обжига поднимаются на верхние пути гидравлическими подъемниками 15.

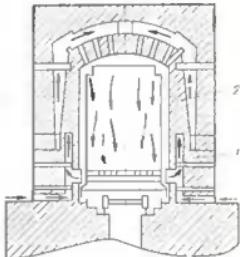


Рис. 43. Газовая завеса между обес-
чиательной и восстановительной зо-
нами

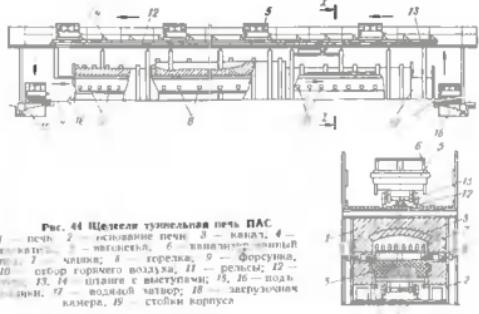


Рис. 44 Щелевая туннельная печь ПАС.

рых происходит сжигание топлива с последующим рассредоточенным отбором газов в зоне подогрева. Таким же способом в канализированный под подают холодный воздух и отбирают горячий воздух в зоне охлаждения. При одновременной садке изделий на вагонетке отпадает необходимость в устройствах для выравнивания температур по высоте садки, чем упрощается конструкция печи. Печной канал имеет небольшую длину, и потому затруднительно разграничивать зоны с окислительной, восстановительной, нейтральной средой. Эти недочеты не оказывают существенного влияния на качество изделий вследствие интенсивного тепло- и массообмена между тонкостенными изделиями и печными газами.

Вместо песочных затворов в описанной печи применены водяные затворы, которые способствуют охлаждению стальной конструкции вагонеток. В некоторых малогабаритных туннельных печах вместо колесных вагонеток применяют скользящие в направляющих легкие платформы, футерованные лористикой огнеупором. Изделия устанавливают непосредственно на платформы, без карбонатного канализированного пода.

Техническая характеристика (проектная) печи ПАС

| | |
|--|-----------|
| Длина печного канала, м | 28,4 |
| (Ширина печного канала, м | 0,98 |
| Используемая высота, м | 0,28 |
| Число вагонеток в печи, шт. | 30 |
| Число чашек на вагонетке при спаренной загрузке, шт. | 128 |
| Предположительность цикла обжига и охлаждения, ч | 3 |
| Производительность по загрузке чашек, шт/ч | 1280 |
| Максимальная температура обжига, °С | 1380—1410 |
| Расход угля/топлива, кг/ч | 0,85 |
| Мощность электродвигателя, кВт | 56 |

Сопоставление эксплуатационных показателей работы печей с вагонетками разных конструкций приведет к дальнейшему усовершенствованию малогабаритных туннельных печей со скоростными режимами обжига. Очевидным их преимуществом по сравнению с конвейерными печами является надежная и бесперебойная работа при температурах обжига свыше 1300° С, так как контроль состояния вагонеток и ремонт их производится вне печи, тогда как попытки организовать бесперебойную работу конвейера при таких температурах не дали положительных результатов.

МУФЕЛЬНЫЕ ТУННЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

В муфельных печах обжигаемые изделия не соприкасаются непосредственно с топочными газами, а нагреваются путем передачи тепла изделия через ограждение из огнеупорных муфельных коробок или плит. Вследствие относительно невысокой теплопроводности огнеупорных материалов, применяемых для сооружения муфельных стен и коробок, нагревание изделий до заданной темпера-

туры протекает медленнее, чем в печах непосредственного нагрева. Поэтому муфельный обжиг получил распространение лишь в производстве тех керамических изделий, которые при непосредственном их обжиге пламенем допускают загрязнение глазурей или ее восстановление продуктами сжигания топлива и другие дефекты.

Муфельные печи преимущественно применяют для обжига тонкой керамики — фаянса, полударфора, изотермического фарфора и художественного «мягкого фарфора», облицовочных плиток, майолики, каменных изделий, покрытых цветными глазурями, а также для закрепления красок после декорирования фарфора и фаянса. Далее даны описание современных наиболее распространенных муфельных печей, предназначенных для заводов тонкой керамики.

Туннельные печи с дельтовидными муфелями, используемые в США и в других странах для обжига санитарных изделий, облицовочных плиток и художественной керамики, покрытых цветными глазурями, как и другие туннельные печи, имеют три зоны: подогрева, спекания и охлаждения обожженных изделий. Общая длина этой самой производительной муфельной печи 131 м, в том числе зоны подогрева около 30 м, зоны обжига (сжигания топлива) около 18 м и охлаждения 83 м. Используемая ширина печного канала 1,34, а высота 1,9 м, причем 0,15 м высоты занято канализованным подом, на котором устанавливают изделия. Устройство зон обжига и подогрева в таких туннельных печах — их основное отличие от других печей с муфельным и полумуфельным нагревом.

Основными конструктивными элементами зоны обжига и части зоны подогрева являются два канала, выложенные из пустотельных элементов печи, между которыми проходят вагонетки с этажерками 5, 6 (рис. 45) для установки изделий. Четыре пустотельные плиты 1—4 с отверстиями прямоугольного сечения складываются в форме трапеции. Эти плиты собираются через отверстия с печным каналом и между собой. Дельтовидные муфельные элементы, сложенные из трубычатых плит, плотно смыкаются по длине печи и образуют каналы для сжигания топлива.

Расположение отверстий и монтаж плит муфельных элементов проектируют с таким расчетом, чтобы менее нагретый воздух из нижней части печного канала проходил по направлению стрелки через канал 7 под садкой изделий, а затем через горизонтальные каналы плит 1, подогреваясь, поднимался бы через вертикальные каналы плит 2, 3 и через верхние наклонные каналы плит 4 выходил под свод печного канала.

В печном канале горячий воздух отдает часть тепла обжигаемой продукции и, не мере охлаждения, направляется к поду вагонеток, затем опять циркулирует по схеме, показанной на рис. 45.

Входная часть зоны подогрева и конец зоны охлаждения оборудованы стальными теплообменниками (рис. 46, а, б), в трубах циркулируют топочные газы зоны подогрева и холодный воздух зоны охлаждения.

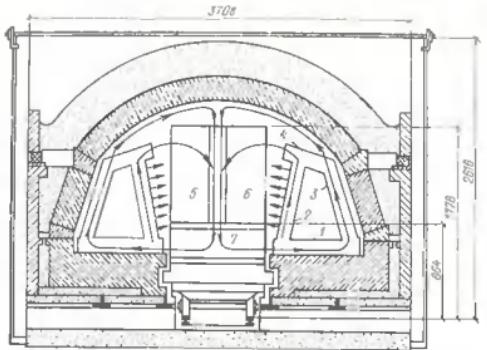


Рис. 45. Циркуляция газов в дельтoidalной мuffleйной печи
— пустотные плиты; 2 — изолер; 7 — канализированный под вагонетки

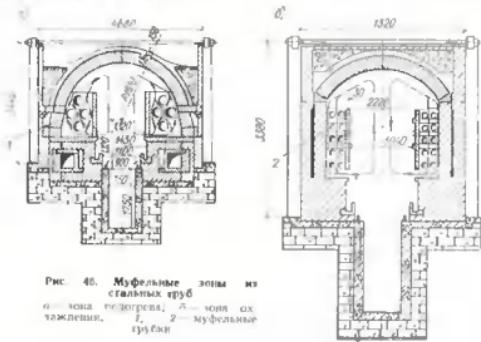


Рис. 46. Мuffleльные зоны из стальных труб
1 — зона горелки; 2 — зона охлаждения;
3 — мuffleльные трубы

Стоимость дельтoidalных каборундовых и муллитовых мuffleльных секций ввиду их довольно сложной конструкции высокая. Если принять для мuffleльной печи длиной 85 м длину зоны с каборундовыми мuffleлями 20 м и длину зоны с муллитовыми мuffleлями 15 м, то стоимость огнеупорных мuffleлей составила бы около 20 тыс. долларов на одну печь в зависимости от стоимости

карборунда. Поэтому на заводах, где по условиям производства можно ограничиться печами с меньшей производительностью (соответственно меньшими сечениями печного канала), построены и успешно работают в производстве разных видов тонкой керамики печи с однорядными пустотельными мuffleльными плитами или с пластинчатыми мuffleлями.

В туннельной печи с однорядным трубчатым мuffleлем (рис. 47, а, б) камеры сжигания топлива ограничены со стороны печных вагонеток стенкой из пустотельных плит, установленных на карборундовых или муллитовых коробках 2. Коробки имеют тонкие стени со стороны топочных газов, подаваемых горелками 3, причем эти стени открыты в сторону обжигаемых изделий. Поэтому раскаленные стени этих коробок интенсивно излучают тепло под карборундовые этажерки 4 с изделиями через П-образные подставки 5.

Основная часть тепла от топочных газов передается обжигаемым изделиям путем излучения стенок трубчатых элементов 1 на изделия 4. Мuffleльные стени из пустотельных плит, ограничивающие топочный канал, участвуют в сложном теплообмене. Часть тепла передается на стенку, ограничивающую печной канал, излучением топочных газов. Остальная часть тепла, полученного от топочных газов, передается воздуху, который циркулирует в каналах мuffleльных плит по направлению к своду печи, затем через садку изделий и между подставками 5 канализированного пода вагонетки и через отверстия в коробках плит 2 возвращается в каналы мuffleльных плит 1. Разность температур воздуха, нагреваемого стеканием мuffleя и охлаждаемого затем при прохождении через садку изделий, стимулирует потоки раскаленного воздуха в печном канале.

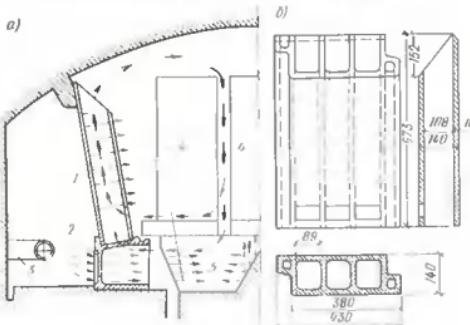


Рис. 47. Циркуляция газов в однорядных мuffleлях из пустотельных плит
— схема циркуляции газов и нагрева шлаком; б — конструкция плиты

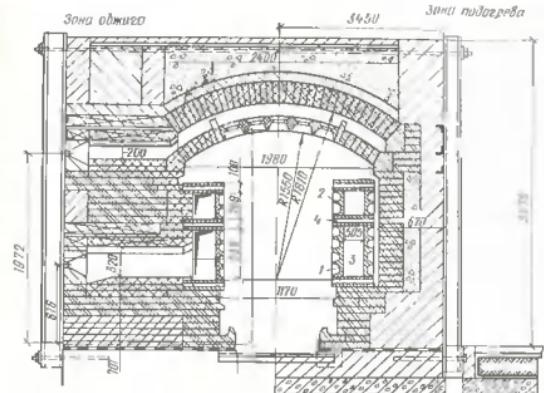


Рис. 48. Горизонтальные муфельные камеры из ребристых варфорундовых плит в разрезе

1 — трубчатый элемент, 2 — коробчатые панели, 3 — канал, 4 — горизонтальная панель

Обусловленный этими потоками конвективный теплообмен способствует выравниванию температуры обжига по сечению печного канала. Выравниванию температуры сажи по высоте способствует излучение раскаленной коробки 2, передаваемое через канализации неподвижных вагонеток. Печи с однорядным муфелем используют для обжига плиток с цветными глазуями. При одноврсной загрузке санитарного фаянса с высотой сажи до 0,75 м и шириной 1,35 м для снижения расхода кирбонда массу кирбонидовых и мультиковых (в зоне подогрева) муфельных шлак приносят примерно в три раза меньшую, чем плит в печах с делтовидными муфелями, рассчитанными на высокую многоярусную сажу наделки на вагонетках.

Стоимость 1 м² карбонатной муфельной зоны из однородных плит, по данным фирмы «Дресслер», составляет около 30-40% стоимости 1 м² муфельной зоны, оборудованной дельтовидными муфелями.

В печах с однорядными мүфелями, построенных в США, для одноврсной садки санитарных изделий не требуется стажерка из карбонильных панелей. При одноврсной садке производительность пачельной печи снижается и появляются удельные затраты на постройку печного цеха. Вместе с тем резко снижается расход карбонильного (перекод дефицитного) и мүллитового припаса и облегчается загрузка вагонеток изделиями.

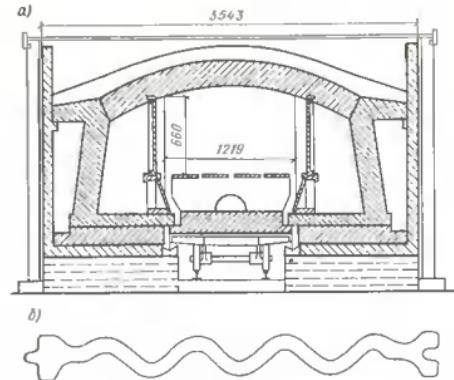


Рис. 48. Муфели из волнистых карборундовых плинт
а — поперечный разрез муфельной зоны из волнистых плинт, б — волнистые карборундовые плинты

Муфельные печи при прочих равных условиях (температура обжига, размеры печного канала и др.) стоят дороже печей прямого действия из-за высокой стоимости карборундовых и муллитовых муфельных элементов. Для ущемления муфельных печей и упрощения конструкции муфелей были предложены менее сложные муфели с меньшими расходами карборуна, собранные из карборундовых плит: ребристых (рис. 48) или волнистых (рис. 49).

Карбонизованная плита показана на рис. 49, а, б. Эти плиты, сопрягаемые друг с другом в схематически показанных замках, образуют сплошную стену. Вертикальное рифление мүфельного фронта со стороны садки изделий облегчает движение горячего воздуха в восходящих потоках, чьяющаяющим раскаленную поверхность мүфельных плит, и способствует конвективному теплообмену. Технологические затруднения, которые возникают при изготовлении тонкостенных трубчатых элементов мүфелей из толстых карбонизованных пласти, послужили существенным препятствием к внедрению таких плит на зарубежных и отечественных заводах по производству огнеупоров.

Превосходство муфельных печей перед туннельными печами непосредственного обогрева и перед конвейерными печами обусловлено высоким качеством обжигаемой в них глазурованной тонкой керамики, надежностью и продолжительностью службы этих печей без установок на капитальный ремонт.

КОНВЕЙЕРНЫЕ ПЕЧИ

Особенности конвейерных печей. Конвейерные печи, применяемые для обжига керамики, отличаются малым сечением печных каналов и небольшими нагрузками на конвейеры, перемещающие малогабаритные изделия.

Основное назначение конвейерных печей — скоростной обжиг малогабаритных тонкостенных изделий. При скоростном обжиге малая вместимость канала конвейерной печи компенсируется соответствующим сокращением продолжительности обжига. Для обжига в интервале температур 700—1100° С используют печи с роликовыми, полочными или ленточными (сетчатыми) конвейерами из жароупорных сплавов.

Для сетчатого конвейера, работающего при температурах до 800° С, используют, например, проволоку из жароупорной стали марки Х23Н13. Для изготовления секций роликового конвейера, работающих в зоне обжига при температурах до 1100° С, используют сплавы с высоким содержанием никеля и хрома: X25Г, AX2318Н, ХН78Т и др.

Трубчатые ролики из высокогнеутопных материалов, например мультиловые, корундомуллитовые, могут успешно работать и при более высоких температурах.

Конвейеры, работающие в зоне обжига при высоких температурах даже при выполнении их из самых стойких жароупорных сплавов, обычно загружают изделиями в один ярус непосредственно на сетчатую ленту или на легких поддонах (лещадках) в открытых капселях легкой конструкции (кассетах). На заводах тонкой керамики применяют пламенные и электрические конвейерные печи. Муфельные конвейерные печи используют преимущественно для обжига цветных глазурованных облицовочных плиток, декоративного фарфора и фаянса и работают на жидким топливе, природном газе и с электроборгевом.

Обжиг на природном газе или жидкое топливо экономичнее электрического обжига, и потому конвейерные печи с непосредственным или муфельным обогревом с помощью жидкого топлива или газа при использовании их в производстве керамических плиток, хозяйственного фарфора и фаянса более перспективны, чем печи с электроборгевом.

Конвейерные печи отличаются меньшим, чем в больших туннельных печах, расходом рабочей силы на загрузку и выгрузку изделий, когда в механизированных поточных линиях изделия автоматически передаются с предшествующей операции на конвейер, а с него на конвейер последующего процесса.

При одновременной загрузке конвейера изделиями достигается более равномерная температура обжига, чем в печах с большим сечением канала. Благодаря этому преимущество в конвейерных печах из цикла обжига исключается время, необходимое для выравнивания температур по высоте печного канала. Поэтому в конвейерных

печах достигается существенное сокращение продолжительности обжига мелких в тонкостенных изделий. Продолжительность бескамельного обжига тонкостенных фарфоровых чашек или плиток по сравнению с обжигом их в мощных туннельных печах уменьшается в несколько раз.

Вместе с тем конвейерные печи имеют и недостатки, пока еще ограничивающие их применение на отечественных и зарубежных керамических заводах.

При включении конвейерных печей в непрерывнодействующие линии все связанные с обжигом технологические процессы должны выполняться в трехстадийном режиме. В туннельных печах имеется на третью смену запас загруженного на ваюнетах полуфабриката, и поэтому кроме малочисленного персонала, обслуживающего печи, весь завод может работать в две смены.

При использовании конвейерных печей в автоматических линиях возникает вопрос о конструировании автоматических конвейерных питателей (накопителей) для аккумуляции полуфабриката на третью смену.

При скоростных и высокотемпературных режимах обжига конструкционные материалы, используемые для конвейеров, — жароупорные сплавы, оgneупорные и термостойкие плиты или капсели — должны обладать надежностью в эксплуатации и обеспечивать длительную бесперебойную работу конвейерных печей во избежание долгостоящих простояев связанных с ними непрерывно действующих линий.

Как туннельные, так и конвейерные печи непрерывно совершенствуются. Конкурентоспособность этих двух типов непрерывно действующих печей при обжиге разных типов изделий в конечном счете определяется экономическими показателями их работы в заданных условиях.

В настоящее время преимущественная область применения конвейерных печей — обжиг в интервале температур 700—1100° С малогабаритных изделий, допускающих скоростные режимы обжига без ущерба для качества получаемой продукции.

Приводим описание и технические характеристики наиболее распространенных пламенных и электрических конвейерных печей.

Роликовые конвейерные печи для обжига облицовочных плиток. Одноканальные газовые конвейерные печи с непосредственным нагревом изделий по проектам НИИстройкерамики были впервые построены в автоматических линиях на Кучинском комбинате керамических облицовочных материалов. В этой печи выполняется предварительный (первый) обжиг плиток до температуры 1080° С и второй обжиг после глазурования их до 1020° С. Канал печи первого обжига имеет длину 19,6 м, ширину 1,3 м, высоту 0,22 м и выполнен из шамотного оgneупора с теплоизоляцией из памятного и диатомитового легковеса.

Плитки проходят зону подогрева и обжига длиной 8,4 м и охлаждения 11,2 м на роликовом конвейере, который смонтирован на

общем с печным каналом каркасом. Ролики конвейера диаметром 32 мм и длиной 2330 мм размещены с шагом между осями 70 мм, что дает возможность обжигать плитки с размерами не менее 150×150 мм непосредственно на конвейере без жароупорных поддонов. Обжиг без поддонов упрощает конструкцию и эксплуатацию печи и дает существенное снижение расхода топлива.

Ролики для зоны обжига изготавливают из жароупорных сплавов. От температуры и длительности службы роликов без деформации зависит эффективность работы роликовых печей, так как простота замены деформированных роликов нарушает режим работы автоматической линии и снижает ее производительность. Поэтому ведутся инженерные поиски сплавов для роликов, работающих без замены при более высоких температурах.

Повышение температуры обжига в роликовых печах дало возможность использовать керамические массы из недорогих и недефицитных материалов. На Свердловском заводе керамических изделий в результате экспериментальных исследований и проверки в производственных условиях тщательные ролики из сплава Х23Н18 были заменены роликами из железохромоникелевого сплава ХН45-10, что дало возможность повысить температуру обжига до 1120°C и срок их службы.

В зонах подогрева и охлаждения в соответствии с кривой температур применяют ролики из стали и сплавов соответствующей жароупорности.

Вращение роликов выгibtают цепной передачей от приводной станции, на которой предусмотрена возможность изменения скорости конвейера и продолжительности обжига плиток и соответственно производительности печи. Режим нагрева в зонах подогрева и обжига регулируют количеством сжигаемого газа в мелких инжекционных горелках. Горелки размещены под конвейером и над ним в шахматном порядке для двухстороннего нагрева плиток. Высокая производительность одноканальных конвейерных печей достигается за счет сверхскоростных режимов обжига неглазурованных плиток (продолжительность спекания и охлаждения при первом обжиге 17–20 мин, а глазурованных плиток при втором обжиге 28–31 мин).

Для создания окислительной среды, необходимой при обжиге плиток, покрытых цветными глазурами, применяют муфельные конвейерные печи или печи с непосредственным нагревом газовыми инжекционными горелками Ф-15/0,9; Ф-21/1,3 и Ф-24-1,5 с предварительным смешиванием газа и воздуха. Регулирование горелок для получения беспламенного горения при втором обжиге имеет весьма важное значение, и потому использование недорогих систем для автоматизации обжига может при повышении стартового выхода плиток дать существенный экономический эффект.

Учитывая расширение печного канала при разогреве и сжатие при охлаждении, он разделен на семь секций каждая длиной по 2,8 м, свободно перемещающихся на раме конвейера.

В соответствии с режимом нагрева и охлаждения на печи первого обжига в первой, второй и третьей секциях по ходу конвейера установлено под роликовым конвейером по пять пар горелок В-2,8,1,7 и В-28/1,9, и две пары горелок В-1,3 над роликовым конвейером в пятой секции.

В печи второго обжига канал длиной 39,2 м имеет зону подогрева и обжига длиной 22,4 м и зону охлаждения длиной 16,8 м.

Зона обжига отделяется от зоны подогрева и охлаждения пережимом канала до минимальной щели, необходимой для размещения роликов и прохождения плиток.

Печь собрана из 14 секций. Первые семь секций имеют по пять горелок, восьмая — три горелки, а 10-я и 11-я — по две горелки. Во всех секциях горелки размещены под роликовым конвейером. Давление газа у сушки 0,1616 МПа, у горелок 0,1414 МПа. Плитки 150×150 мм подаются конвейером в четырех ряда. Проспектная производительность печей при назначенных режимах первого и второго обжига составляет 250 m^3 в год.

Автоматические линии по производству плиток для полов отличаются от вышеописанной сушкой в двух секциях с промежуточным охлаждением, что обусловлено большей, чем у глазурованных плиток, толщиной, а также отсутствием глазуровочной установки и печи второго обжига.

Более простая структура линии позволяет организовать и ей два конвейерных потока с двухъярусной конструкцией сушки, печей и роликовых конвейеров. Двухъярусные автоматические линии работают эффективно в производстве стандартных, большемерных и кислотоупорных плиток с удвоенной производительностью по сравнению с одноярусными автоматическими линиями. Размеры, форма плиток и технология массового производства облицовочной керамики более, чем в других производственных, благоприятствовали использованию скоростных режимов обжига в конвейерных печах и широкому распространению автоматических линий на заводах СССР. В табл. 7 приведены характеристики роликовых конвейерных печей, разработанных в основном НИИстрикерамикой и освоенных на заводах по производству строительных керамических изделий СССР.

Одноканальная муфельная конвейерная печь была спроектирована для обжига мазутом неглазурованных плиток, но защита плиток в этой печи от непосредственного контакта с топочными газами дает возможность обжигать в таких печах глазурованные цветные плитки. Предельная температура обжига (по проекту) — 1100°C — обусловлена условиями эксплуатации роликового конвейера. В щелевых печах нет условий, благоприятных для полного сгорания жидкого топлива: выбор муфельного варианта конвейерной печи для заводов, не располагающих природным газом, дает возможность получать глазурованные плитки лучшего качества, чем при непосредственном их омыании продуктами сжигания мазута.

Таблица 7. Характеристика радиоковых печей открытого излучения с газовым отоплением

| Наименование | Собственные условия | | | | При работе | | | |
|--|---------------------|----------------------|--------------|-----------|------------|--------------|---------|-----------|
| | Установка | Индивидуальный отоп. | Литий-ионный | Установка | Газовая | Направленная | Газовая | Установка |
| Диаметр печи, м | 22,4—24 | 39,6—42 | 33 | 56 | 33,6 | 42 | 60 | 27 |
| Прием пепного канала в свету, м | 0,9 | 0,9 | 1,15 | 1,3 | 0,9 | 0,9 | 1,15 | 1,1 |
| Высота пепного канала в зоне обогрева от уровня пола до замка, м | 0,62 | 0,62 | 0,73 | 0,75 | 0,62 | 0,62 | 0,73 | 0,65 |
| Объем пепного канала, м ³ | 9,5—10 | 18—19 | 22 | 44 | 16 | 19 | 41 | 14,5 |
| Число секций (фасет) | 8 | 14 | 11 | 18 | 12 | 15 | 20 | 9 |
| В том числе в зоне обогрева | 2,5 | 4 | 3 | 6 | 4,5 | 8,5 | 10,5 | 3 |
| обогрева | 1,5 | 3 | 2 | 4 | 2,5 | 1,5 | 2,5 | 1,5 |
| отражения | 4 | 7 | 6 | 8 | 52 | 5 | 7 | 4,5 |
| Число роинков (всего) | 320 | 560 | 510 | 740 | 480 | 810 | 1200 | 540 |
| В том числе из сплавов | 40 | 160 | 80 | 100 | 00 | 108 | 180 | 60 |
| С-20 | 140 | 270 | — | — | 200 | 216 | — | — |
| ХН18Н10Т | — | — | 200 | 300 | — | — | 300 | 300 |
| У25Т | 40 | 230 | 80 | 280 | 80 | 237 | 480 | 60 |
| У22Н18 | 100 | — | 150 | — | 140 | 189 | 240 | 120 |
| УН78Т | | | | | | | | — |

| | | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Длина роинков, м | 1,96 | 1,96 | 2,18 | 2,33 | 1,96 | 1,96 | 2,18 | 1,88 |
| Количество роинков, мм | 26 | 26 | 32 | 32 | 28 | 28 | 32 | 28 |
| Шаг роинков в зоне х, мм, подогрева и отражения | 70—75 | 70—75 | 75 | 76 | 52 | 50 | 50 | 50 |
| обогрева | 70—60 | 70—60 | 60 | 75 | 70 | 52 | 50 | 50 |
| Тип горелок | B-21, B-28 | B-21, B-28 | B-24 B-28 | B-21, B-28 | B-21, B-28 | B-21, B-28 | B-21, B-28 | B-21, B-28 |
| Производительность горелок при нормальном условии, м ³ /ч | 1,3—2,5 | 1,3—2,5 | 1,5—2 | 1,3—2,5 | 1,3—2,5 | 1,3—2,5 | 1,3—2,5 | 1,3—2,5 |
| Число горелок (всего) | 25 | 40 | 39 | 46 | 47 | 56 | 123 | 31 |
| В том числе, никелированных | 20 | 40 | 29 | 46 | 41 | 50 | 71 | 21 |
| Вертикаль | 5 | — | 10 | — | 6 | 6 | 52 | 10 |
| Прием теплоизлучаемости, м ² /тад | 250 000 | 250 000 | 500 000 | 200 000 | 200 000 | 400 000 | 200 000 | 200 000 |

Ширина муфельного канала печи 0,9 м, высота до замка свода около 0,5 м. Длина зон подогрева и обжига 28 м, длина зоны непосредственного охлаждения плиток воздухом 14 м. Под и свод рабочего муфельного канала выложены из карбوروидных плит, а боковые стены — из шамотного легковеса ШЛ-0,4. Газы из нижних топок проходят под муфельным каналом, а из верхних — над его сводом, а затем по борову — в рекуператор и дымосос.

Количество и температура топочных газов регулируются количеством сжигаемого топлива в форсунках нижних и верхних топок. Пять нижних топок устроены в виде топочного канала с наклоном 30° в сторону зоны подогрева. Карбороидный свод муфеля нагревается шестью боковыми топками. Плитки охлаждаются непосредственно (без муфельных перегородок) встречными потоками воздуха, подаваемого вентилятором, через щелевидные каналы в стенах печи.

Печь сложена из высокоглиноземистого огнеупора с теплоизоляцией шамотным легковесом и пенодиатомитовым кирпичом. Ролики конвейера, как и в других печах, имеют звездочки для сжигания мазута, вихревые форсунки конструкции ВНИИ теплопроект с паро-воздушным распылением, дающим короткий факел пламени.

Наибольшая производительность выбранной форсунки 15 кг/ч при давлении пара 0,25—0,3 МПа и давлении воздуха 0,001960 МПа.

Давление мазута (0,2 МПа) создается шестеренчатыми насосами НШ-3 с приводом от электродвигателей постоянного тока.

С помощью регуляторов возбуждения РВ 5202 производится бесступенчатое регулирование производительности каждой форсунки в соответствии с назначенным режимом обжига. Краткая техническая характеристика муфельных роликовых печей приведена в табл. 8.

Температуру обжига в печах подобного типа можно повысить при использовании в конвейере высокогнеучорных роликов. Карбороидный муфель допускает повышение температуры до 1250° С. В модификации муфельной конвейерной печи можно организовать обжиг низкотемпературного фарфора на лещадках. В этом варианте шаг и диаметр роликов соответственно увеличиваются и достичь астяи увеличения нагрузки на конвейер без снижения срока службы роликов. Недостатком конструкции печи является размещение нижних горелок под подом печи, что повлекло за собой устройство смолового туннеля под печью, увеличение ее стоимости, некоторые неудобства обслуживания нижних форсунок. Не было нужны отказываться от принятого в проекте размещения верхних горелок в стенах печи.

Конвейерные муфельные печи с ленточным конвейером. Такие печи применяют для предварительного обжига фарфоровой посуды и раскрашенной керамики при температуре до 800—900° С. Защита изделий от непосредственного воздействия пламени надежно обеспечивает в печном канале окислительную среду, необходимую для получения ярких рисунков, нанесенных керамическими красками.

Таблица 8. Характеристика муфельных роликовых печей

| Характеристики | Печь для полного обжига облицовочных плиток | Печь для обжига плиток подовых |
|--|---|--------------------------------|
| Длина печи, м | 45 | 42 |
| Длина муфельных каналов, м | 22 | 28 |
| Высота муфельных каналов, м: | | |
| верхнего | 0,261 | 0,247 |
| нижнего | 0,203 | 0,203 |
| Ширина печного канала в свету, м | 0,86 | 0,9 |
| Высота печного канала от уровня муфельных плит пода до замка плит свода, м | 0,412 | 0,473 |
| Объем печного канала, м ³ | 15 | 16 |
| Число секций (всего) | 19 | 14 |
| В том числе в зонах: | | |
| подогрева | 5 | 8 |
| обжига | 5 | 1,5 |
| охлаждения | 9 | 4,5 |
| Число роликов (всего) | 760 | 810 |
| В том числе из сплавов: | | |
| Сx20 | 100 | 60 |
| X25T | 395 | 210 |
| Оx23Н18 | 263 | 400 |
| XН76T | — | 140 |
| Длина роликов, м | 1,96 | 1,88 |
| Диаметр роликов, мм | 28 | 28 |
| Шаг роликов, мм | 60 | 50 |
| Топливо | B28 | Мазут |
| Тип горелок (форсунок) | | |
| Производительность горелок (форсунок) при нормальных условиях, м ³ /ч | 2—2,5 | 15 |
| Число горелок или форсунок (всего) | 61 | 11 |
| В том числе: | | |
| нижних | 40 | 6 |
| верхних | 24 | 5 |
| Производительность, м ³ /год | 250 000 | 200 000 |
| Вихревая конструкция ВНИИ теплопроект | | |

В печах предусмотрены канал длиной 19,55 м, шириной 1,09 м и высотой 0,22 м, в котором перемещаются изделия на сетчатой ленте конвейера из жароупорных сплавов, например из стали марки X23Н18. Длина зон подогрева 5,54 м. Зона обогрева в основном смонтирована из 12 чугунных блоков I с печным каналом 2 и дымовыми каналами 3 (рис. 50, а). Ленточный конвейер 4 с роликами 7 изделия подаются через зоны подогрева, обжига и охлаждения. Через каналы 3 навстречу изделиям подаются дымовые газы из зоны обжига, и в зоне подогрева через стены блоков постепенно нагревают изделия и затем удаляются в атмосферу. Блоки изолированы в коробе 5 диатомитовой засыпкой и замыкаются у входной части коробкой 6 сшибром 6, высоту подъема которого устанавливают в соответствии с высотой изделий.

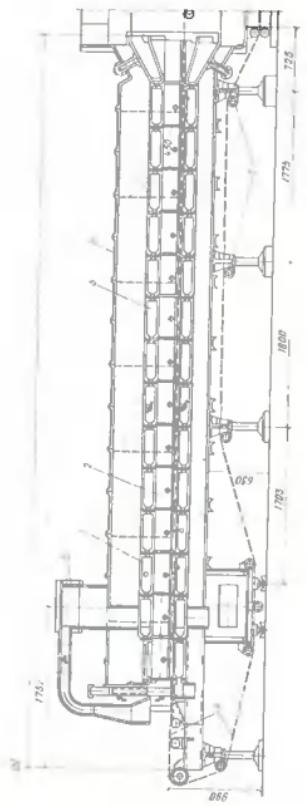
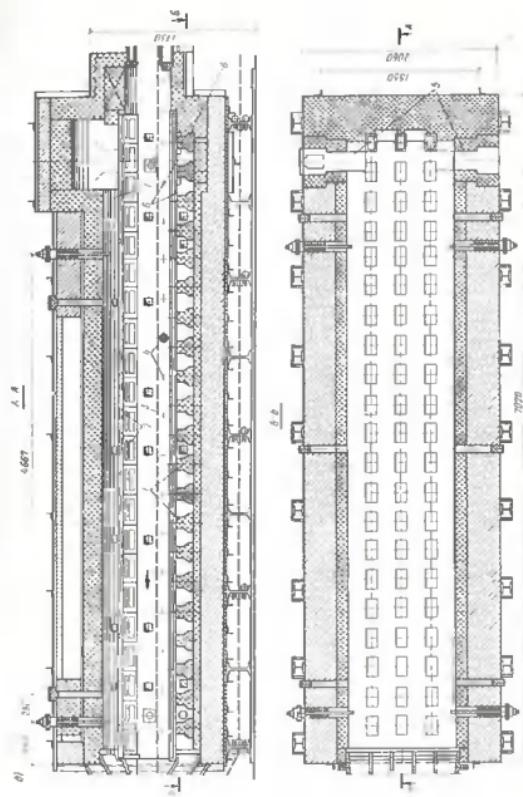


Рис. 50. Конвейерная мебельная арка с деревянным транспортером

а — зона погрузки, б — зона обжига



В начале зоны подогрева расположена труба для удаления паров или газов, выделяющихся при разложении органических веществ из керамических изделий. Чугунные блоки печного канала и короб теплоизоляции смонтированы на раме из швеллерных балок, установленных на колонках. На этих же колонках смонтированы поддерживающие ролики возвратной ветви конвейера. Зона подогрева присоединена переходным чугунным блоком к зоне обжига.

Длина зоны обжига 7,02 м. Стены, свод и под зоны сложены из шамотного кирпича. Стены и под изолированы шамотными легковесами, а свод — датомитовой засыпкой. Под муфельного канала, над которым конвейером 3 по роликам 4 на шамотных подставках 1 подают изделия из зоны подогрева, выложен из шамотных или карбонудовых плит (рис. 50, б).

В конце зоны обжига устроены газовые топки 5 с горелками ГНП-3 для природного газа. Пламя из двух нижних топок подают в нижние каналы 6, обогревающие под муфеля, а из верхних топок — в каналы 7, обогревающие свод муфеля 2. Топки и подставки 8 в прилегающей к ним части зоны сложены из шамотного огнеупорного класса А.

Зона охлаждения смонтирована из чугунных блоков подобно блокам зоны подогрева. Воздух, охлаждаящий изделия, проходит по каналам чугунных блоков зоны и удаляется вентилятором в атмосферу или на сушку. Привод ленточного конвейера состоит из электромотора, клиновременной передачи, редуктора, зубчатой передачи и ведущего барабана. Натяжение сегментной ленты, вытягивающей под влиянием высокой температуры в зоне обжига, регулируется натяжным блоком.

Техническая характеристика муфельной конвейерной печи

| | |
|---|-----------|
| Длина, м | 23,75 |
| Ширина, м | 2,26 |
| Высота, м | 2,54 |
| Сечение печного канала, мм | 1090×220 |
| Длина ленты конвейера, м | 60 |
| Ширина > > , м | 1,1 |
| Скорость > > , м/мин | 0,021—0,4 |
| Расход теплоты в квадратном газе, МДж/ч | 1466,5 |
| Расход воздуха, м ³ /ч | 10 000 |
| Давление воздуха перед горелкой, Па | 2500 |
| Мощность электродвигателя привода, кВт | 0,5 |
| Осадка теплоты цех около, МДж/ч | 377 |

Многоканальная газовая конвейерная печь фирмы «Сити» (Италия). Такие печи установлены на Воронежском заводе керамических изделий для обжига глазурованных фаянсовых плиток и работают на газообразном топливе. По сравнению с многоканальными конвейерными электропечами той же фирмы эти печи имеют ряд преимуществ: изделия загружаются в одном конце печи и выгружаются в другом; поток обжигаемых плиток удобно и просто сочетается с предшествующими и последующими процессами механизирован-

ных и автоматизированных линий. В электропечах вынужденные встречные передвижения плиток не позволяют рационально организовать производственные поточные линии на современных заводах. Использование газа вместо электричества дает больший экономический эффект.

В электропечах температура обжига плавится с помощью срока службы нагревательных элементов (из кантата и других сплавов) в пределах 1100—1200 °С, что ограничивает область применения этих печей. В газовых конвейерных печах при использовании высокого-огнеупорных керамических роликов и высокого-огнеупорной футеровки можно повысить температуру обжига и расширить область при менения конвейерных печей при благоприятных температурно-экономических показателях их эксплуатации.

Две газовые печи, фирмы «Сити», построенные на Воронежском заводе по производству керамических изделий, как и электрические печи этой же фирмы, компактны и имеют легкие конструкции. Основные изменения внесены в конструкцию зоны обжига. В каналах огнеупорных плит, разделяющих роликовые конвейеры смежных ярусов печи, размещены (вместо нагревательных спиралей) камеры для сжигания подаваемой из микротреков смеси газа с воздухом. Размещение горелок газопроводов в печи показано на рис. 51. Устройство союла, предназначенное для подачи газовоздушной смеси в камеры сгорания, дано на рис. 52.

Печь имеет 12 каналов, размещенных в четырех ярусах, разделенных огнеупорными плитами, поэтому представляется возможность в известной мере регулировать температуру обжига в каждом ярусе, если в одной печи потребовалось бы обжигать изделия разных ассортимента. Четкое число ярусов в электропечах фирмы «Сити» обусловлено встречным движением изделий. В первой газовой печи были использованы основные узлы четырехъярусной электропечи. При разработке новых газовых печей можно размещать ярусы в трех, пяти и семи ярусах в зависимости от необходимой производительности печи. Загрузка плиток в газовые печи на указанном заводе производится автоматически с полочных контейнеров. Контейнер состоит из трех отделений, в которых размещено по 40 штампованных плиток, предназначенных для автоматической загрузки лещадок. На каждой лещадке размером 475 × 360 мм размещается шесть плиток размером 150 × 150 мм. Контейнер загружается в течение 10—12 мин.

Переключением привода роликового конвейера можно регулировать продолжительность обжига в широких пределах в зависимости от состава массы и глазури изделий. Плитки обжигаются в конвейерных печах в течение 4 ч 15 мин. Эксплуатация роликового конвейера в зоне обжига с температурой выше 1100 °С при использовании роликов из жароупорной стали опасна вследствие их деформации.

Сплавы с высокой жароупорностью весьма дороги и дефицитны. Поэтому в зоне обжига нелестообразно использовать керамические

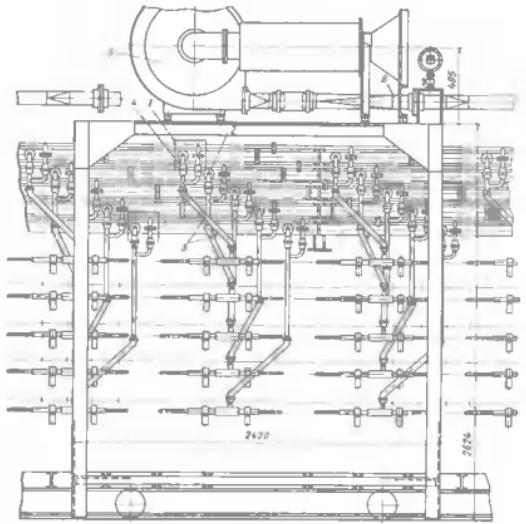


Рис. 51. Размещение горелок газопровода в печи фирмы «Сити»
1 — узел смешивания воздуха и газа; 2 — патрубок воздушной трубы; 3 — газопроводы;
4 — регулятор смещивания воздуха и газа; 5 — вентилятор подачи воздуха для охлаждения

(мультито-корундовые) ролики, которые изготавливают на Воронежском заводе по производству керамических изделий. Газовые многоярусные конвейерные печи, построенные в 1970 г. на вышеизвестном заводе, работают бесперебойно, причем выпускают глазурованные фаянсовые плитки высокого качества.

Использование недорогого, по сравнению с использованием электроэнергии, топлива, высокое качество обжигаемых изделий, возможность применения керамических роликов вместо роликов из сплавов, большая при прочих равных условиях (температуры и продолжительности обжига) производительность одного агрегата — все это является важным преимуществом рассматриваемых печей по сравнению с другими конвейерными печами.

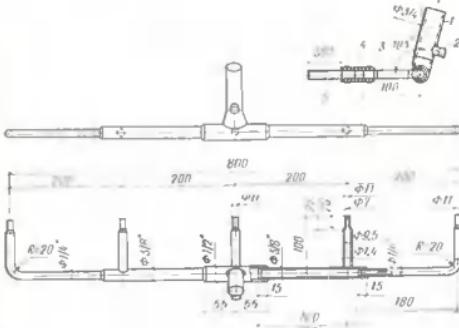


Рис. 52. Устройство сопла для подачи смеси газа в камеры
(обозначения те же, что и на рис. 51)

Техническая характеристика газовой многоканальной конвейерной печи

| | |
|---|-----------|
| Длина печи, м | 40,8 |
| Число каналов | 12 |
| Число ярусов и ветвей конвейера | 4 |
| Длина каналов, м | 35,8 |
| Ширина каналов, м | 0,37 |
| Высота каналов, м | 0,11 |
| Расход природного газа, м ³ /ч | 50—60 |
| Давление газа перед регуляторами, МПа | 0,06 |
| Рабочее давление газа у горелок, Па | 4413 |
| Давление воздуха, Па | 1177 |
| Температура уходящих дымовых газов, °С | около 160 |
| Температура воздуха, отбираемого из зоны охлаждения, °С | около 200 |
| Температура выходящих изледий, °С | 30—40 |

Многоканальные конвейерные электрические печи. Несмотря на снижение продолжительности обжига в одноканальной конвейерной печи, она остается иногда экономически невыгодной вследствие малой производительности, плохого использования заводской площади и увеличения потерь тепла и окружающей среды по сравнению с туннельной печью, имеющей канал большего сечения. Поэтому для увеличения производительности такой печи и сокращения ее тепловых потерь широко используют принципы объединения многих каналов (до 48) в одном блоке, а при использовании электроагрегата — объединения встречных потоков обжигаемых изделий.

В виде примера приводим устройство и работу роликовой многоканальной конвейерной электропечи производства фирмы «Сити»

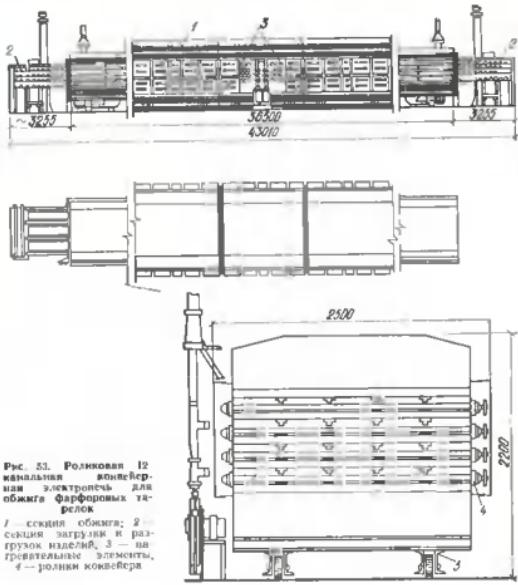


Рис. 53. Роликовая 12-канальная конвейерная электропечь для обжига фарфоровых тарелок
1 — секция обжига; 2 — секция загрузки и разгрузки изделий; 3 — нагревательные элементы; 4 — ролики конвейера

для обжига фарфоровой посуды с невысокой температурой спекания (около 1200° С), а также глазурованных плиток (с температурой спекания 1050—1100° С), применяемой на зарубежных и на некоторых отечественных заводах.

Роликовая 12-канальная конвейерная электропечь фирмы «Сити» для обжига фарфоровых тарелок. Печь, установленная на Бориславском (УССР) фарфоровом заводе, имеет 12 каналов, каждый длиной 36,5 м, шириной 370 мм и высотой 115 см (рис. 53). Каналы размещены в четырех ярусах по три канала в каждом ярусе. Изделия перемещаются в каналах роликовыми конвейерами на лентых кордиритовых поддонах, встречными потоками: в первом и третьем ярусах изделия двигаются в одном направлении, а во втором и четвертом ярусах — в противоположном. Печь

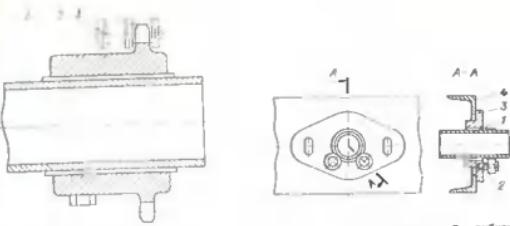


Рис. 54. Стальной ролик

Рис. 55. Высокоглиноземистый трубчатый ролик

соброй конструкции, состоящей из семи обжиговых секций 1 (рис. 53) и двух открытых концевых секций 2, причем одна секция предназначена для загрузки изделий, другая — для их разгрузки. Все секции смонтированы в стальных каркасах на катках, наводящих эти секции перемещаться вследствие их расширения при разогреве печи.

Печные каналы выложены из пустотелых огнеупорных камней, в которых оставлены проемы для роликов конвейера и для укладки в них нагревательных спиралей из кантала. Плиты не имеют отверстий для стержней, так как они предназначены для зон подогрева и охлаждения, где для нагрева изделий используется линия теплое встречное охлаждаемого потока. Наружные ограждения секций выполнены из эффективной теплоизоляции.

Роликовый конвейер каждого яруса состоит из 216 роликов и обслуживает три канала. В зонах нагрева и охлаждения применяют стальные ролики (трубы) длиной 2000 мм и диаметром 50 мм. На одном конце ролика закреплена звездочка 2 (рис. 54) для цепного привода 3 конвейера в зоне обжига, где температура выходит за пределы устойчивости металлических роликов, используются высокоглиноземистые трубчатые ролики 1 (рис. 55) диаметром 50 мм, свободно катящиеся на катках 2. Катки 2 монтируют с помощью фланца 3 на продольной балке 4 каркаса печи.

Такое устройство роликового конвейера дает возможность быстро заменять ролики после их разрушения или деформации без длительных простоев печи. Расстояние между осями роликов 170 мм, что обусловлено длиной поддона, на которые загружают подаваемые в печь изделия. Поддоны изготавливают из кордиритовой термостойкой керамики в виде тонкой (5 мм) плиты длиной 520 мм, шириной 356 мм (рис. 56) с ребрами жесткости высотой 12 мм. При такой длине поддона всегда оправится не менее чем на три ролика.

Тарелки и другие подобные фарфоровые изделия с высоким содержанием плавней, спекающиеся при температурах, не превышающих 1200° С, укладываются в один ряд на карборундовых подставках,

покрытых глиноzemистой обмазкой. Для печей с не высокими температурами и скоростными режимами обжига термостойкие корднеритовые поддоны, отличающиеся в этих условиях высокой обрабатываемостью (сырье 100 циклов), оказались наиболее экономичными.

В зоне обжига в пазах фуговки уложены электронагреватели из хромферроалюминия (типа кантал), регулированием температуры которых определяется конечная температура обжига изделий и продолжительность процесса спекания фарфора при однократном обжиге или наложения глазури при двухкратном обжиге фарфора или фаянсовых плиток. Подогрев и охлаждение изделий происходит за счет рекуперации тепла охлаждаемых встречных потоков изделий и поддонон. В пазах снижение до минимума потери тепла с отходящими газами из этих зон отбирается небольшое количество воздуха (необходимое лишь для удаления выделяющейся из изделий влаги).

Характерные для электропечей, работающих по принципу пропитки, кривые температур нагрева и охлаждения изделий показаны на рис. 57. Техническая характеристика конвейерной роликовой электропечи приведена в табл. 9.

Таблица 9. Техническая характеристика конвейерных роликовых электропечей фирмы «Сити»

| Показатель | Печь | |
|---|----------------------------------|-------------------|
| | для обжига глазурованных тарелок | для обжига плиток |
| Длина печи (забарниная), м | 43 | 43 |
| Ширина печного канала, м | 36,5 | 36,5 |
| Число каналов в четырех ярусах | 12 | 12 |
| Горячая температура обжига, °С | До 1200 | 1050—1180 |
| Продолжительность обжига, ч | 3 | 3—3,5 |
| Горючая пропиленгликольность, тыс. см ³ | — | Около 300 |
| Установленная мощность для нагрева, кВт | 150—500 | 450 |
| Мощность приводов, кВт | 10 | 18 |
| Расход электроэнергии на 1 кг обожженных изделий, кВт | 0,6—0,7 | 0,4 |

Многоканальная конвейерная роликовая электропечь фирмы «Сити» для обжига плиток. Такие печи применяют в нашей стране на некоторых заводах для обжига глазурованных плиток, а за рубежом — для обжига плиток полов и облицовочных фасадов. Печи для обжига глазурованных плиток по устройству аналогичны описанной выше электрической печи для обжига посуды, а по конструкции печи для первого обжига плиток отличаются от печи для обжига посуды числом и размерами каналов, приспособленных к различным условиям загрузки обжигаемых изделий. Печи для первого обжига глазурованных фаянсовых плиток и плиток для полов изгото-

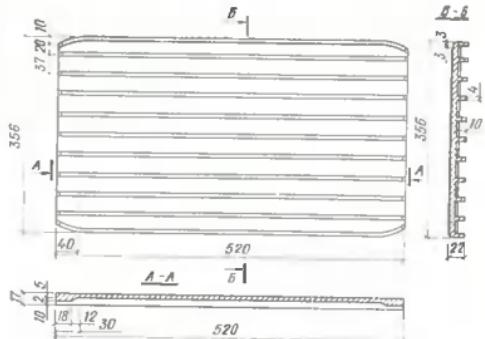


Рис. 58. Конвейерный поддон электрической печи

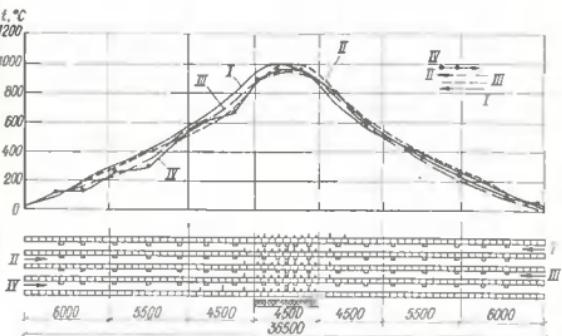


Рис. 59. Кривые температур (T , °С) обжига и охлаждения изделий в многоканальной электропечи

ляют с 36 или 48 каналами. Плитки укладывают стопками в зависимости от их толщины по 12—20 шт. на карбонитровые поддоны толщиной до 25 мм и перемещают в муфельных каналах печи по роликовому конвейеру. В зоне обжига муфельные каналы выложены из мульлитовых плит, которые имеют гнезда для укладки в них нагревателей из кантала.

Наибольшая температура, достигаемая при использовании этих нагревательных элементов, 1250° С. Однако в целях сокращения удельного расхода электроэнергии и увеличения срока службы нагревательных элементов на заводах используют керамические массы с высоким содержанием плавней, требующих пониженных температур обжига. Удельный расход энергии при обжиге до 1100° С и продолжительности цикла в 40 ч равен 5 кВт · ч на 1 м² неглазированных плиток.

Второй способ плиток (глазурованных) производят на ребристых карбонитровых поддонах подобно вышеописанному обжигу тарелок. На одном поддоне укладывается шесть плиток размером 150 × 150 × 150 мм. Техническая характеристика конвейерной многоизделийной электропечи для обжига глазурованных плиток также приведена в табл. 9.

ГЛАВА VIII. ПЕЧИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛА

§ 20. КЛАССИФИКАЦИЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Основным агрегатом в производстве изделий из стекла является стекловаренная печь. Она предназначена для получения стекломассы из смеси сырьевых материалов (шихты) и боя стекла в условиях высоких температур.

Процесс варки стекла очень сложен и состоит из пяти основных стадий: силикатообразования, стеклообразования, осветления, гомогенизации и стужки. Каждый элементарный объем стекломассы проходит все пять стадий варки. В промышленных стекловаренных печах четкого разделения процесса варки на отдельные стадии нет. Превращение шихты в стекломассу происходит в результате воздействия теплоты, выделяющейся при скижании топлива или прохождении электроэнергии.

Конструкция стекловаренной печи определяется видом используемого топлива, составом и свойствами стекломассы, способом выработки изделий и производительностью печи.

Состав и свойства стекломассы зависят от условий варки и выработки изделий и регламентируют производительность стекловаренных печей.

Для работы печи необходимо материалу передать необходимое количество теплоты, развить высокие температуры. Температура — основной фактор, влияющий на скорость стекловарения. Повышение

производительности печи позволяет снизить удельный расход топлива, повышает ее коэффициент полезного действия.

В современных стекловаренных печах используют высококалорийное топливо: природный газ, жидкое топливо, сжиженные углеводородные газы, которые позволяют развивать необходимые для варки температуры и организовать факел с требуемыми свойствами.

Современные печи классифицируют по принципу работы, способу нагрева, устройству рабочей камеры, направлению движения газов, способу использования теплоты отходящих газов и способу разделения бассейна и пламенного пространства.

По принципу работы применяют печи непрерывного действия (ванные печи), периодические печи (ванные и горшковые).

В печах непрерывного действия все стадии стекловарения протекают одновременно в разных частях печи, в печах периодического действия все стадии варки протекают в одном и том же объеме, но последовательно во времени.

Стекловаренные печи непрерывного действия применяют для производства листового, технического и профильного стекла, бутылок и консервных банок, сортовой посуды, труб, парфюмерной и медицинской тары, светотехнических изделий, стеклопакетов и др.

Стекловаренные печи периодического действия применяют в производстве оптических, цветных, специальных технических и тому подобных изделий.

По способу нагрева можно выделить:

а) пламенные печи; источником тепловой энергии является сжигаемое газообразное или жидкое топливо;

б) электрические печи; источником тепловой энергии является электрический ток;

в) пламено-электрические печи; в них предусмотрена комбинированная нагрев.

По способу выделения теплоты электрические печи подразделяются на печи сопротивления (прямого и косвенного), дуговые печи, индукционные печи. Наиболее распространены печи сопротивления.

По устройству рабочей камеры печи могут быть горшковыми и ванными (непрерывного и периодического действия). Чаще всего применяют ванные печи непрерывного действия как более экономичные и как печи, которые могут быть высокопроизводительными.

По направлению движения газов печи разделяют на горшковые и ванные.

По направлению пламени горшковые печи могут быть с нижним (обратным), верхним, нисходящим пламенем; ванные печи — с поперечным, подковообразным, продольным пламенем; кроме того, с противоточным или прямоточным движением газов в шихте.

По способу использования тепла отходящих газов можно выделить печи с регенеративной системой подогрева воздуха или изокалорийного газа, печи с рекуперативной системой подогрева воздуха.

По способу разделения бассейна и пламенного пространства распространены печи с общим бассейном, разделенные лоджами и

другими устройствами; проточные с разделенным бассейном; проточные с разделенным пламенным пространством (экраном и глухой стеной).

§ 21. ГОРШКОВЫЕ ПЕЧИ

В промышленности в основном применяют печи с нижним пламенем и отводом отходящих газов в поду. Для варки оптических и технических стекол используют одно- и двухгоршковые печи, для варки цветных стекол, хрустали — многогоршковые печи.

По способу использования теплоты отходящих газов применяют в основном регенеративные печи, иногда рекуперативные одногоршковые.

Характеристика горшковых печей представлена в табл. 10. В горшковых печах все стадии варки происходят в объеме горшка. Период варки составляет 16—24 ч. После разогрева печи начинается процесс загрузки шихты. Загрузку производят малыми порциями. Шихта постепенно оплавляется, образуя расплав стекломассы. Перемешивание стекломассы происходит в результате возникающих конвективных потоков (неравномерный нагрев горшка по высоте). Для получения однородной стекломассы обычно (к концу периода провара) используют бурление или механическое перемешивание шихтами. Температура варки составляет 1480—1520° С. После получения однородной стекломассы происходит процесс студки стекла до температуры выработки.

Таблица 10. Характеристика горшковых печей

| Печь | Использование пламени | Число горшков | Площадь сеч. пламени горшка, м ² | Площ. пода, м ² | Размеры пода | | | К.п.д. (при темп. 1480° С) |
|---|-----------------------------------|---------------|---|----------------------------|-----------------|------------|------------|----------------------------|
| | | | | | длина камн., см | ширина, см | высота, см | |
| Регенеративная: с верхним пламенем | Литое стекло | I—16 | 1—2 | 1—30 | До 12 | 1,5—4 | 3—45 | 4—10 |
| с нижним пламенем | Хрусталь сортовое, цветное стекло | До 16 | 0,3—0,5 | До 4—5 | 1—6 | 1—6 | 2—26 | 3—8 |
| | Оптическое стекло | II | 1—1,5 | 1—1,5 | 2—2,5 | 1,4—1,8 | 3—4 | 2—4 |
| Рекуперативная с нижним, одногоршковым пламенем | Техническое стекло | I—2 | 0,5—1 | 0,5—2 | 2—4 | 1,2—2,5—6 | 2—5 | |

Примечание. Полезная емкость горшка составляет 0,6—0,7 полной его



Рис. 58. Схемы горшковых печей

a — регенеративная с копченко [обратным] пламенем; b — регенеративная с верхним пламенем; c — регенеративная одногоршковая; d — рекуперативная с нижним пламенем. 1 — рабочая камера; 2 — горшки; 3 — горелки; 4 — рекуператоры; 5 — стены; 6 — окно для выработки астаков горшков; 7 — окно для выработки

В период варки и освещения стекломассы топливо сжигают с минимальным коэффициентом избытка воздуха ($\alpha = 1,05\text{--}1,2$), а при выработке, в связи с уменьшением расхода газа, коэффициент избытка воздуха составляет $\alpha = 1,6\text{--}1,8$ (необходимость заполнения рабочего пространства печи газами). При этом температура поддерживается постоянной.

Выработку изделий из горшка производят вручную или методом литья. Схемы горшковых печей даны на рис. 58, а — г. Основным элементом горшковых печей является рабочая камера, которая по своей конфигурации может быть прямоугольной, овальной или круглой форм.

Применение той или иной формы рабочей камеры определяется производительностью, способом выработки и отопления печи. При больших размерах печи, когда необходимо разместить много горшков (12—16), чаще всего используют прямоугольную или овальную форму рабочей камеры.

В одногоршковых печах применяют круглую форму рабочей камеры, которая обес печивает получение равномерной температуры в таких печах. Рабочая камера горшковых печей ограничена подом, сводом и боковыми стенами, в которых размещают окна для вставки горшков, загрузки шихты и ручной выработки стекла. Для подогрева воздуха, идущего на горение топлива, используют регенераторы или рекуператоры.

На рис. 59, а, б показана двухгоршковая рекуперативная печь с нижним пламенем.

В горшковых печах с нижним пламенем (рис. 60) горелочные отверстия располагают в поду печи. Применяют кадиевые или щелевые горелки. В поду также расположены горячий колодец на случай ухода стекломассы из горшка.

В горшковых печах с верхним пламенем применяют шахтные горелки, по горизонтальным каналам которых подают горячий

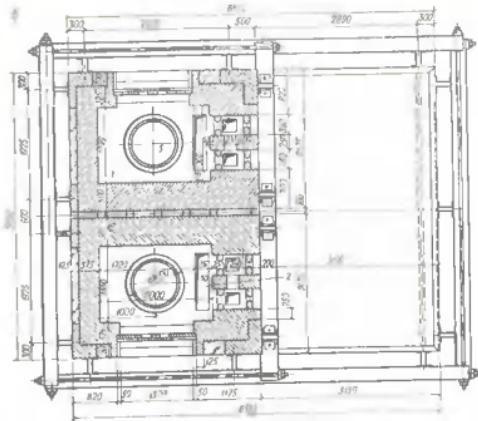
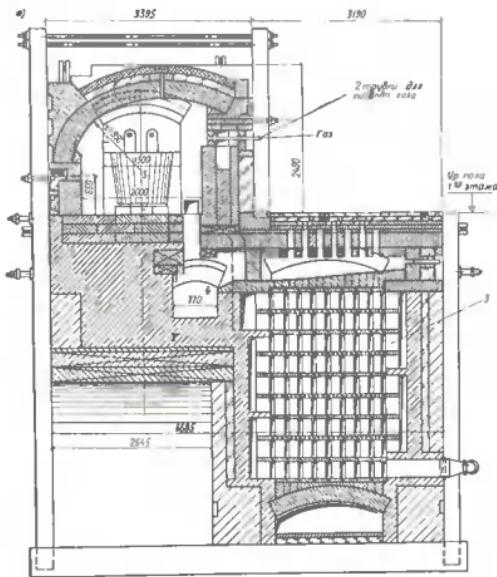


Рис. 59. Двухгоршковая рекуперативная печь (а, б)

производительности и может быть определено по следующей формуле:

$$N = G/G_1 \text{ n.m}^2, \quad (42)$$

где N — число печей; G — производительность, кг/год; G_1 — полезный объем горшка — количество вырабатываемой стекломассы, кг/песок; n — число горшков в печи, принимаемое при выработке сортовой посуды 4—10, технического стекла 1—4, оптического 1; η — коэффициент использования стекломассы, составляющий при производстве сортовой посуды 0,3—0,6; технического стекла — 0,1—0,2; Z — число циклов печи в год, составляющее для сортовой посуды 250—280, для технического стекла — 200—270 при продолжительности варки 24 ч и 100—120 при продолжительности варки 48 ч.

Некоторые конструктивные данные. Размеры рабочей камеры печи принимают минимальными, необходимыми для рассчитанного числа горшков, вставки и выемки их, а также для развития факела пламени.

Расстояние между горками, а также между стеной и горками принимают 200—300 мм; высоту стен до рабочего окна печи 500—700 мм; высоту рабочих окон 300—450 мм; подъем свода печи должен быть до 18—210 пролета; высоту от пода печи до замка свода для печей с верхним плавомением берут 1,5—1,7 м для печей с нижним

воздух из регенератора или рекуператора. В горизонтальном канале происходит частичное предварительное сгорание газа.

В качестве топлива могут быть использованы высококалорийный газ и жидкое топливо: высококалорийный газ подводят в рабочую камеру изблизи места выхода подогретого воздуха, жидкое топливо подают с помощью трубы капельника.

Загрузку горючих инхтой осуществляют специальными приспособлениями или вручную.

Для кладки пола горшковых печей используют шамотные плиты или бакированные плиты, ограничивающие кады; динасовые для кладки спуска и алы стен — зинасовые брусья.

Определение количества горшковых печей и их размеров. Число печей зависит от состава стекла, ассортимента, заданной годовой

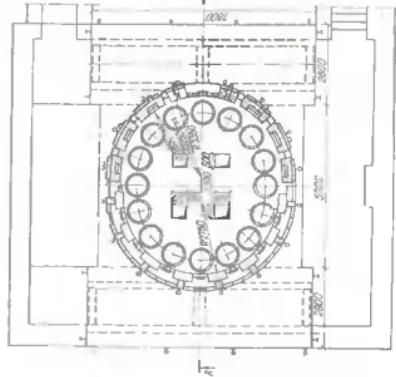
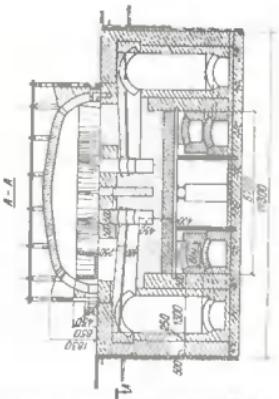


Рис. 60. Гончарская печь с низкими плавленем



Б-Б

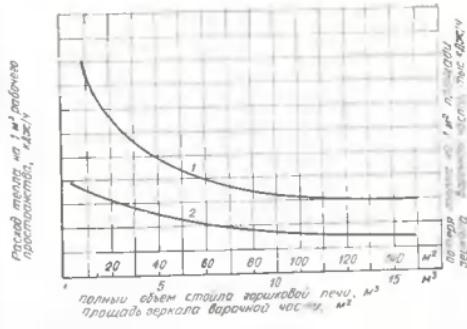


Рис. 61. Максимальный расход теплоты на горшковую печь (1) и потеря теплоты винной печью (2) в окружающую среду

пламенем 1,2–1,5 м; уклон простенок между окнами при ручной выработке должен быть 70°, причем внутри печи. Расстояние от края горшка до края пода принимают 150–300 мм.

Поперечное сечение вьевов горелок должно составлять 1,5–2,5% площади пода; скорость газов во вьете 12–14 м/с; поверхность нагрева насадок регенераторов примерно 15–20 м² на 1 м² пода печи; поверхность нагрева рекуператора 15–20 м² на 1 м³ объема рабочего пространства печи. Площадь зеркала стекла должна составлять 30–40% общей площади пода печи.

Расход топлива определяется по тепловому балансу.

Для ориентировочных расчетов расхода топлива может быть использован график (рис. 61).

Удельный расход теплоты в горшковых печах составляет для изготовления полого стекла соответственно при площади пода: 6 м² ≈ 75 · 10³ кДж/кг; 10 м² ≈ 60 · 10³ кДж/кг; 16 м² ≈ 45 · 10³ кДж/кг; 20 м² ≈ 30 · 10³ кДж/кг. Для изготовления прессованного стекла ≈ 30 · 10³ – 50 · 10³ кДж/кг.

§ 22. ВАНИЕ ПЕЧИ

В промышленности для варки большинства стекол применяют ванные печи непрерывного действия, а для варки и выработка специальных стекол в небольших количествах — ванные печи периодического действия.

В ванных печах варку стекла производят в бассейне, выложенным из стойких огнеупорных материалов.

Ванные печи периодического действия могут быть с поперечным направлением пламени (рис. 62) и с подковообразным направлением пламени (рис. 63).

Приведенные конструкции ванных печей периодического действия применяют для варки светотехнических, клинкерных и спе-

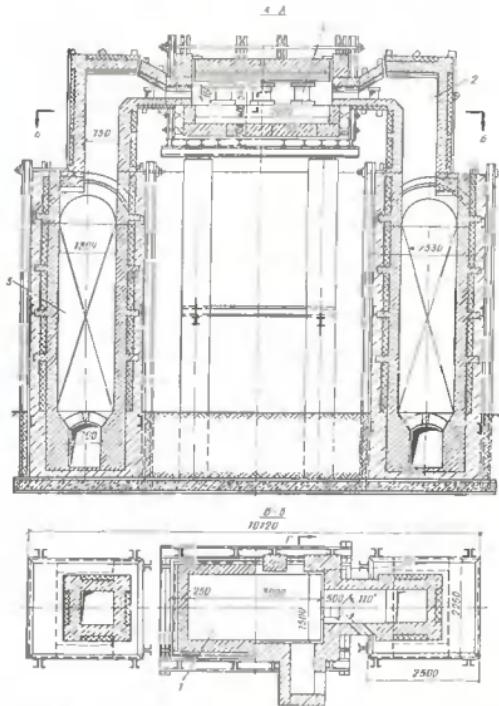


Рис. 92. Ванная печь периодического действия с поперечным направлением пламени: 1 — ванна, 2 — горелка, 3 — регенератор [высота 63 см — регенератор], 4 — выработанные окна [эксплозионные двери для рис. 92-63].

циальных стекол. Температура варки 1480–1600° С, температура выработки 1230–1380° С. Глубина бассейна 400–700 мм. Длительность варки и выработки составляет 24–48 ч. Производительность периодических печей до 5 т за один цикл.

Для повышения однородности стекла в печах периодического действия используют перемешивание или бурление стекломассы.

Одним из недостатков печей периодического действия — повышенный износ брусьев бассейна из-за частых колебаний температуры

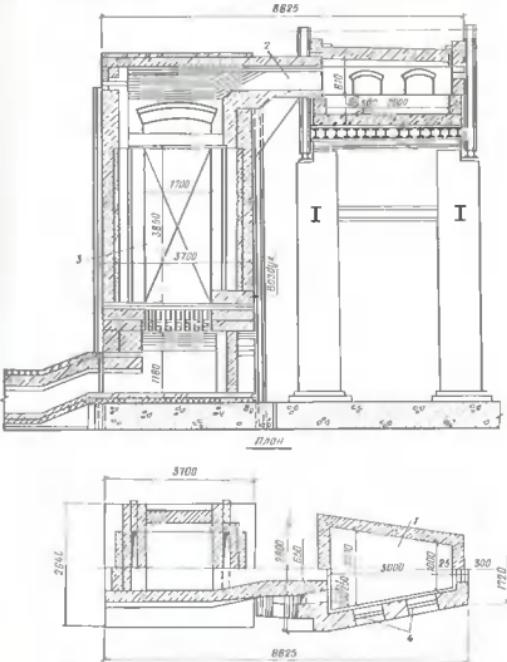
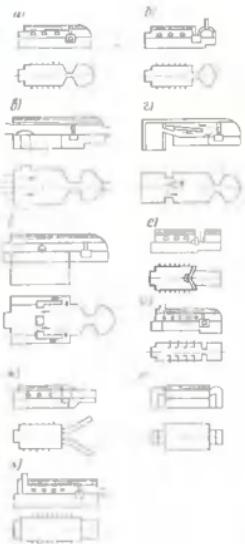


Рис. 63. Винная печь периодического действия с подковообразным направлением пламени



(варки и выработки) в снижение уровня стекломассы при выработке на 150–250 мм.

Рабочая камера печи периодического действия представляет собой ванну-бассейн, выложенный из стойких огнеупорных материалов. Над бассейном расположено пламенное пространство, ограниченное боковыми стенами и сводом. Изделия вырабатывают в основном вручную, через окна расположенные в продольной стене пламенного пространства.

Для отопления ванных печей периодического действия используют газообразное и жидкое топливо. Воздух подогревают в регенераторах.

Ванные печи периодического нагрева по сравнению с горшковыми: требуется объем рабочей камеры, неизменное

Размер бассейна печи периодического действия определяется по удельной схеме стекломассы ($\text{кг}/\text{м}^2$). По практическим данным площадь бассейна ванной печи периодического действия составляет $1 - 5 \text{ м}^2$, глубина $400 - 600 \text{ мм}$.

Ванные печи непрерывного действия. В ванных печах непрерывного действия различают варочную часть (зоны варки и освещения), выработочную часть (зоны ступки и выработки) (рис. 64, а — л).

По направлению движения газов относительно потоков шахтного воздуха ванные регенеративные печи могут быть с поперечным, продольным и подковообразным направлениями. Данные о размерах и работе ванных печей см. в табл. II.

В регенеративных печах с площадью варочной части свыше 50 м^2 , как правило, используют коническое направление пламени. При по-

Характеристика ванных стекловолокнистых печей непрерывного действия

| Признак | Продуктивное напыление | Бактерии | | | | Установка для отплавки (стальной плавильный плавильный котел) | Температура плавления, °С |
|--|---|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------|
| | | шаровая камера, м, м | дисковая камера, м, м | губчатая камера, м, м | пластинич- ная камера, м, м | | |
| Открытая (без предрал) с напылением | Птичье стекло | 6—9 | 18—30 | 1,5 | 80—90 | 80—400* | 1,2 |
| открытым напылением, регенеративная | Бульдозерное (тектоническое) стекло | 6—7 | 12—15 | 0,9—1,2 | 70—90 | — | 0,6—0,9 |
| С предралом, напылением, ре- генерацией | Штуцевые изоляции: стекло; капрон | 6—8 | 8—20 | 1,2—1,5 | До 150 | — | 0,9—1,2 |
| С предралом, напылением, ре- генерацией, напылением плазмы, ре- генерацией | Кабельная изоляция (поли- бензойное) | 0,8—3 | 1,6—7,1 | 0,5—1,2 | До 30 | — | 0,5—0,9 |
| | Штуцевые изоляции, трубопроводное стекло | 2,5—6 | 2,5—8 | 0,6—1,2 | До 45 | — | 0,6—0,9 |
| | Ту же | | | | | | 8000—1500 |
| | С предралом, прямого напы- ления, без регенераторов | | | | | | 10—30 |
| | С предралом, подкисленным напылением, вакуумной регенерацией или рекупе- рацией | | | | | | |

Указаны птицы из стадной части природного заповедника «Лесная Птица» и птицы, вылетающие из леса в любое время года.

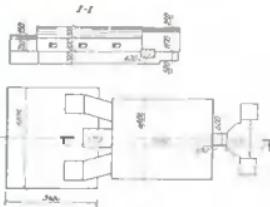


Рис. 65. Ванная печь с подковообразным направлением пламени и загрузочными карманами, расположенными с торца печи между горелками

релками с торца печи. Движение газов в рекуперативных печах подковообразное, продольное или комбинированное.

Ванные печи непрерывного действия с заграждением (лодками) или без заграждения, с развитой конвекцией применяют для производства листового стекла различными методами: вертикального вытягивания, горизонтального вытягивания, методом проката. В

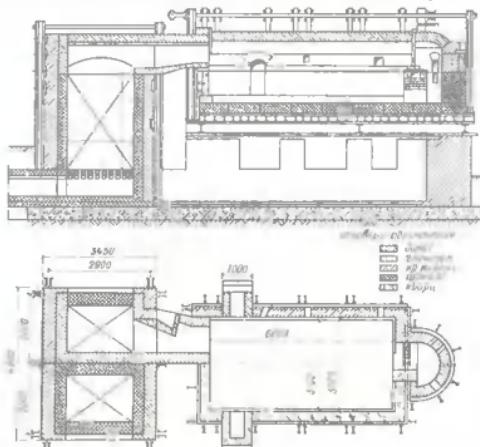


Рис. 66. Регенеративная ванная печь с подковообразным направлением пламени и загрузочными карманами, расположенными по продольной стороне печи

перечном направлении пламени горелки располагают по продольным сторонам печи, что позволяет регулировать температуру по длине печи. Загрузку печи устраивают с ее торца. В печах малых размеров (с площадью варочной части до 50 м²) осуществляют подковообразное движение газов (рис. 65), горелки предусматривают с торца печи. Загрузочные карманы располагают на продольных сторонах (рис. 66) или между горелками с торца печи. Движение газов в рекуперативных печах подковообразное, продольное или комбинированное.

Ванные печи непрерывного действия с заграждением (лодками) или без заграждения, с развитой конвекцией применяют для производства листового стекла различными методами: вертикального вытягивания, горизонтального вытягивания, методом проката. В

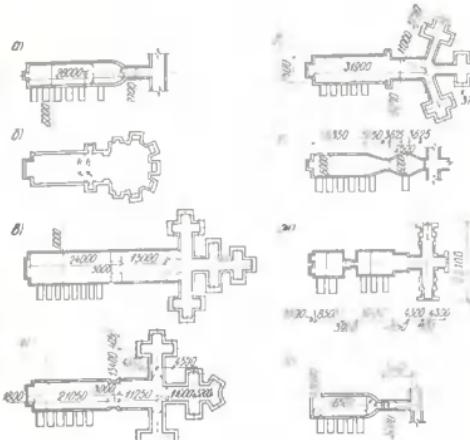


Рис. 67. Схемы ванных печей листового стекла
— с общим бассейном; — с заградительными лоджиями; а, б, в, г — без разделения бассейна; д — радиальный бассейн

настоящее время используют главным образом ванные печи без конструктивного разделения бассейнов в зоне стекломассы. Схемы ванных печей листового стекла приведены на рис. 67, а — г. Пламенное пространство печи разделяется экраном на границе между варочным и студочным бассейнами. Направление движения газов поперечное; использование теплоты отходящих газов для подогрева воздуха или низкокалорийного газа регенеративное (рис. 68, а, б).

Площадь варочного бассейна печей для производства листового стекла составляет 100—300 м²; площадь студочного бассейна составляет 50—150% площади варочного бассейна; глубина варочного бассейна 1,5 м, студочного — 1,2 м; глубина машинного канала 0,9 м; ширина варочного бассейна 7—10 м, студочного — 5—6 м.

Наиболее целесообразно строительство мощных ванных печей большой производительности, так как удельный съем увеличивается с увеличением размеров печи, снижаются удельные тепловые потери и себестоимость продукции.

Печи с протоком применяют для производства штучного стекла: тарного, сортового, электровакуумного, парфюмерной и антикарской тары и др. Устройство протока позволяет уменьшить конвекционный поток (свести к нулю коэффициент потока) между вар-

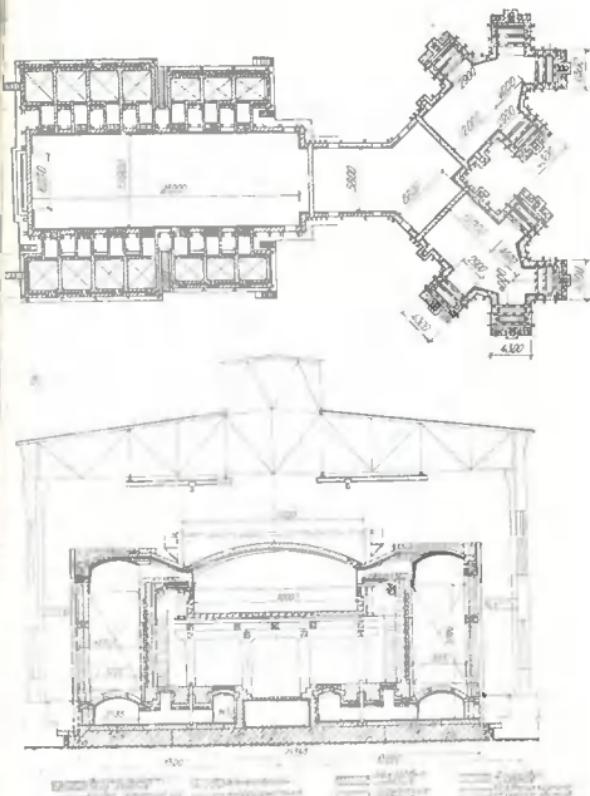


Рис. 69. Регенеративная варочная печь для производства листового стекла на семь пар горелок.

рочным и выработочным бассейнами печи, отбирать стекломассу из варочного бассейна более охлажденную и наиболее проваренную. Для улучшения регулирования режимов варочного и выработочного бассейнов их разделяют по пламенному пространству экраном или выработочный бассейн отделяют полностью от варочного, предусматривая самостоятельное отопление и отвод газов.

Конструктивно протоны выполняют на уровне дна печи. Протоны могут быть незаглубленными, заглубленными, приподнятыми, наклонными и др. (рис. 69).

Применение того или иного типа протоны печи зависит от состава стекла, производительности печи и применяемых огнеупоров. Обычно на практике сечение протона составляет 300—400 600—700 мм, длина 1000—1300 мм.

Основных типов печи с протоном при площади варочного бассейна свыше 40—50 м² является регенеративная (рис. 70) печь с концентрическим направлением газов, при меньшей площади варочного бассейна регенеративная или рекуперативная с подковообразным направлением газов, приодыенным (рекуперативная с двойным сводом) (рис. 71) и прямого нагрева (рис. 72).

В последнее время все больше применяют печи с малым выработочным бассейном (рис. 73) или вместо выработочного бассейна используют каналы, соединяющие варочный бассейн с выработочными устройствами. Уменьшение выработочного бассейна позволяет увеличить производительность печи за счет увеличения варочного бассейна, повысить качество стекломассы.

Несмотря на значительные усовершенствования малых регенеративных печей с протононами (площадью варочного бассейна до 30—40 м²), тепловый коэффициент полезного действия таких печей остается низким (8—15%), а стоимость их

составляет высокая.

Начиная с 1956 г. широкое распространение получили так называемые печи прямого нагрева.

Печь прямого нагрева представляет собой узкую и вытянутую в длину канаву, отапливаемую смесительными горелками, работающими

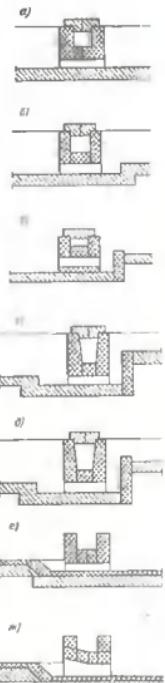


Рис. 69. Конструкции протонон

а, б — незаглубленный; в — приподнятый; г, д — заглубленный; е, ж — плавающий; з — фасонный.

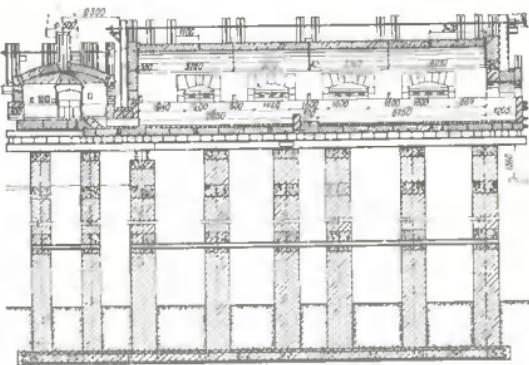
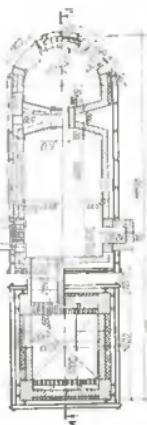
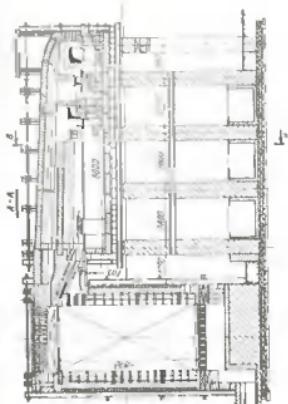
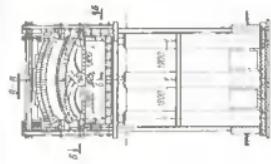
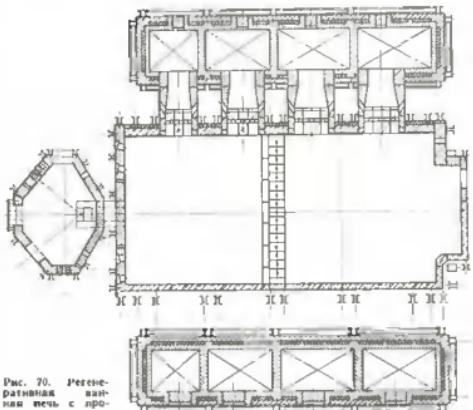
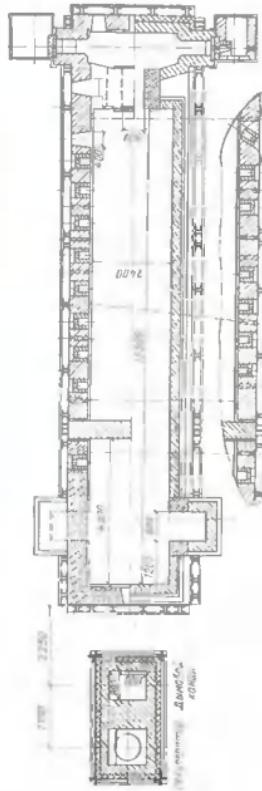


Рис. 70. Регенеративная ванна печь с протоком



PER 1: PREVIOUSLY PUBLISHED IN THE JOURNAL OF CLIMATE



щими на холодном воздухе или на подогретом до температуры 400° С. Отношение ширины печи к ее длине 1 : 4—5. Регенераторов или рекуператоров (керамических) печь прямого нагрева не имеет.

Горелки расположены по длине печи, что обеспечивает высокий коэффициент покрытия зеркала стекломассы газами. Дымовые газы движутся по отношению к ширице противотоком, что резко уменьшает агрессивное влияние шинхтной пыли на кладку печи и позволяет повысить температуру варки стекломассы.

К преимуществам печей прямого нагрева следует также отнести: возможность сжигания топлива с минимальным избытком воздуха ($\alpha = 1,05$), возможного достижения высоких температур без подогрева воздуха или с подогревом до температуры 250—400° С, снижение теплопотерь за счет возможности тепловой изоляции свода, подвесных стен, бассейна и дна печи, а также за счет меньшей глубины бассейна (глубина бассейна обычно составляет 500—800 мм и зависит от состава стекла) и высоты верхнего строения. Печи прямого нагрева экологичны, так как требуют меньше производственных площадей, меньшего расхода строительных материалов (отсутствуют регенераторы и переводные клапаны), кроме того, имеется возможность смены состава стекла без остановки печи.

Однако печи прямого нагрева требуют высококалорийного топлива (природного газа или жидкого топлива) и ограничены размерами варочного бассейна. Из-за использования двухвходовых горелок полного смешивания (короткофакельных) ширина печи не может быть более 3—3,5 м, а это ограничивает производительность печи до 60—70 т/сут. Характеристика печей прямого нагрева приведена в табл. 12. Один из недостатков печей прямого нагрева — высокая температура отходящих газов (1000—1200° С).

Таблица 12. Характеристика печей прямого нагрева

| Варочная часть | Производительность | | | Температура газов, °С |
|----------------|--------------------|-----------|-------------------------|-----------------------|
| | длины, м | ширины, м | площадь, м ² | |
| 6 | 1,2 | 1,2 | 1,44 | 5—9 |
| 8,4 | 1,2 | 10,1 | 12,12 | 12 500—17 600 |
| 9 | 1,8 | 10,2 | 19,08 | 9—20 |
| 11 | 1,8 | 19,8 | 35,64 | 12—40 |

Для использования теплоты отходящих газов за печами прямого нагрева, как правило, устанавливают радиационные рекуператоры, что позволяет снизить температуру отходящих газов до 630—760° С. Для более полного использования теплоты отходящих газов наиболее целесообразно устанавливать котлы-утилизаторы, а за ними рекуператоры для подогрева воздуха. Применение указанных устройств позволяет снизить температуру дымовых газов до 200° С,

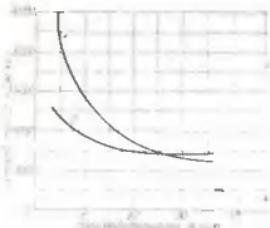


Рис. 74. Сравнение расхода топлива регенеративной печи 1 и печи прямого нагрева 2

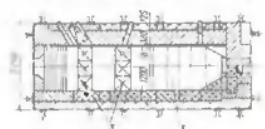
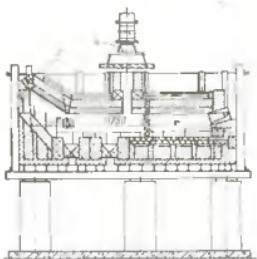


Рис. 75. Прямоточная печь
1 — варочная камера; 2 — горелка; 3 — отверстия для засыпки барботажных колес; 4 — отвод дымовых газов

новысить коэффициент полезного действия ванных печей при нагрева до 50—55%.

Печи прямого нагрева могут быть использованы для варки специальных и цветных стекол, эмаэлей, хрустали и др.

Сравнение расхода топлива на 1 кг сваренного стекла печи прямого нагрева (площадью варочной части $\approx 20 \text{ м}^2$) и регенеративной печи (площадью варочной части $\approx 17 \text{ м}^2$) представлено на рис. 74.

В последнее время нашли применение прямоточные печи (рис. 75), в которых процессы стекловарения проходят в несколько раз быстрее, чем в регенеративных печах или печах прямого нагрева, так как процессы варки и осветления стекломассы осуществляются в тонком слое. В прямоточных печах стекломassa движется прямым потоком.

Для ускорения растворения кварца в районе плавления шихты предусматривается интенсивное барботирование стекломассы.

Преимуществами прямоточных печей являются: сокращение производственных площадей для их размещения; снижение расхода топлива на 40—50%; возможность быстрой смены состава стекла; повышенные удельные съемы.

Прямоточные печи применяются для варки профильного, узорчатого, армированного кирково-мозаичного стекла и других изделий. Прямоточные печи могут быть регенеративными или печами прямого нагрева с использованием теплоты отходящих газов в рекуператорах. Глубина бассейна в зоне осветления 150—400 мм, в зо-

не барботирования — 600 мм. Производительность прямоточных печей, работающих в промышленности, составляет до 20 т/сут.

За последние время существующие конструкции стекловаренных печей в значительной части усовершенствованы: стала эффективнее их работа, увеличилась производительность, улучшилось качество стекла, стал выше коэффициент полезного действия, увеличилась длительность работы печей.

Повышение эффективности работы стекловаренных печей достигнуто в результате применения высокотемпературного режима варки (до 1380 °C); использования эффекта направленного теплообмена; расширения зоной горелок; внедрения нижнего подвода газа, обеспечивающего максимальное покрытие зеркала стекломассы пламенем; применения дополнительного электронагрева с целью повышения температуры непосредственно в стекломассе и бурления стекломассы перед притоком и в зоне варки; установки мешалок для повышения однородности стекломассы; создания независимого теплового режима в выработочных бассейнах (отделения их от варочного бассейна по пламенному пространству); использования для кладки печей электроизвестняковых огнеупоров и других усовершенствований.

Внедренные в промышленность печи прямого нагрева и прямоточные печи экономичны по расходу огнеупоров, имеют низкую стоимость, требуют меньших производственных площадей для их размещения. Широкое распространение для варки специальных технических стекол и хрустали получили электростекловаренные печи. Экономичность печей достигается также за счет использования тепловой изоляции ретигаторов, горелок, свода и стен варочного бассейна, уплотнения регенеративной системы, внедрения автоматического регулирования работы печи.

При разработке новых конструкций стекловаренных печей для рациональной организации парка стекла и интенсификации процессов стекловарения необходимо обратить особое внимание на подготовку шихты, на ускорение теплообмена, увеличение соприкосновения шихты с нагревающими газами, предварительный подогрев шихты; улучшение теплообмена между факелом и стекломассой с целью увеличения скорости протекания реакций; улучшение перемещивания стекломассы и ее гомогенизацию; ускорение процесса осветления; наиболее эффективное использование топлива, минимальный удельный расход теплоты; применение огнеупоров, которые устойчивы к разъеданию стекломассой и шихтой.

Основным направлением в предлагаемых новых конструкциях стекловаренных печей является варка стекла в тонком слое или во взвешенном состоянии, использование различных установок предварительной тепловой обработки шихты, освещение стекломассы в тонком слое.

Ниже даны некоторые предложения по новым конструкциям стекловаренных печей непрерывного действия.

1. Вращающиеся печи. Печь конструкции Цитоса (рис. 76, а) с рабочей камерой, представляющей собой вращающейся барабан

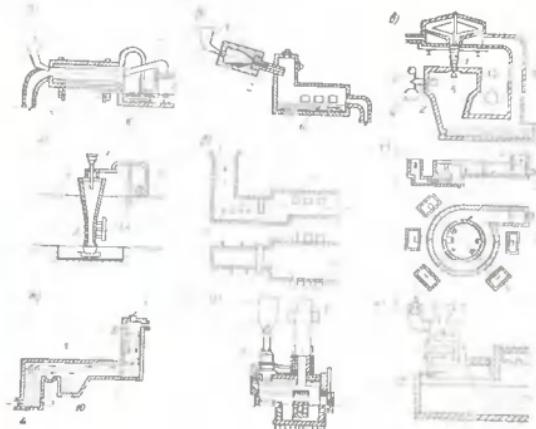


Рис. 76. Схемы новых консерваторий

(скорость вращения 60—100 мин⁻¹), в который подается тонкоизмельченная пыльца противотоком по отношению к дымовым газам. При вращении барабана пыльца и стекломасса покрывают футеровку печи радиочастотным тонким слоем. Сваренная стекломасса скатывается в бассейн, из которого проходит выпарка.

В печи конструкции Боссе (рис. 76, б) шината подается во врашающуюся форкамеру, которая имеет малый угол наклона, благодаря чему шината не проваливается в бассейн угля. Указанные конструкции не получили распространения из-за сильного износа фургонки и низкого качества получаемого стекла.

2. Печи для варки стекла во взвешенном состоянии. Фергуссоном была предложена конструкция печи (рис. 76, а), в которой предусматривалось плавление шихты во взвешенном состоянии и до-варка стекла на стеклянных шахтах печи. Проведенные опыты показали, что футеровка печи сильно изнашивалась, стекломасса была неиз-
породна и загрязнена.

И. И. Китайгородский, Д. Б. Гильбург и В. П. Суровцев предложили шахты вводить в печь (рис. 76, а) сверху, а газ и воздух — снизу, причем таким образом, чтобы шахты находились в извещенном состоянии и не оседали на стены печи. Проведенные испытания показали, что состав расплава неоднороден и наблюдалася большой унос шахты с отходящими газами.

3. Печь с погруженными горелками (рис. 76, д). Печь предусматривает применение предварительно подготовленной пихты, а для улучшения теплообмена между факелом и стекломассой — перемешивание расплава с помощью газов сгорания.

Печь состоит из варочного бассейна, в котором установлены подгруженные горелки 2. Над бассейном размещается теплоизолированная ложка, где происходит предварительный подогрев ниток дымохода газами, вытекающими противотоком из варочной зоны. Осушение происходит в тонком слое.

Погружные горелки могут располагаться вертикально в дне печи или в стенке бассейна.

4. Круглая печь (рис. 76, е). Движение стекломассы происходит только в одном направлении. Печь имеет круглое попечное сечение. Предварительно спрессованная шихта подается через теплообменную колонку 1, где нагревается. Печь снабжена погруженными горелками 2. Проведенные опыты показали возможность получения однородной стекломассы высокого качества.

5. Циклонно-каскадная печь (рис. 76, и). Предложенная Д. Б. Гинзбургом, Ч. А. Матвеевым и И. И. Куксиным конструкция печи позволяет развивать поверхность зоны варки и достигать интенсивного содействия газов и пыли.

Печь работает по следующей схеме: питатель шихты I подает шихту из бункера в циклон 7. Топливо и подогретый воздух подаются в циклон тангенциально. Проваренная стекломасса из циклона стекает на первую осветительную ступень, затем на вторую, далее в бассейн-коильник. Факел пламени направлен на осветительные ступени. Отходящие газы из зон варки и осветления поступают в радиационный рекуператор 5, в котором подогревается воздух, находящийся на скжигание газа.

6. Печь с каскадной теплообменной колонной (рис. 76, к). Шихта из бункера поступает в каскадный теплообменник противотоком по направлению движения дымовых газов. Шихта ссыпается на горизонтальные плиты, омываемые дымовыми газами. Предварительно оплавленная шихта поступает в варочную зону, а затем в зону осветления.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАННЫХ ПОЧЕЙ

Рабочая камера состоит из варочного бассейна (зоны варки и дегазации), выработочного бассейна (зоны студки и выработки) и газового пространства, находящегося над бассейном.

Для выделения отдельных зон предусматривают разделительные приспособления в области стекломассы и газового пространства. Бассейн ванной печи состоит из стен и дна, которые выкладываются из огнеупорного материала насику впритир. Бассейн располагается на самостоятельном фундаменте.

Для уменьшения разъединения кладки бассейна ее делают из крупных фасонных брусьев. Основным материалом для кладки варочного бассейна большинства печей являются электроплавленые бадделеито-корундовые огнеупоры (бакор-33, бакор-41, ЦАК и др.). Дно печи обычно выкладывают из крупных шамотных брусьев (1000 × 400 × 300 мм), сверху футерованных бакоровой плиткой (500 × 600 × 400 – 300 мм). Толщина плитки 75–120 мм.

Для кладки выработочной части рекомендуется электроплавленый корундовый огнеупор.

При кладке бассейна необходимо предусмотреть возможность перемещения брусьев во время их разогрева. Чтобы уменьшить число горизонтальных рядов на кладке стен бассейна, ее целесообразно делать из брусьев большой высоты. Швы между брусьями должны быть доступны для осмотра.

Дно печи укладывают на полосовое железо, уложение на попечечные металлические балки.

Пламенное пространство над бассейном ограничено главным сводом и стенами, которые, как правило, имеют самостоятельное крепление. В приподнятых стенах пламенного пространства при попечном направлении пламени и в торцовой стене при подковообразном направлении пламени предусмотрены влеты горелок для подачи газовоздушной смеси, отвода дымовых газов, окна для контрольных приборов и наблюдения. В стенах выработочного бассейна предусматривают выработочные окна, окна для установки контрольных приборов, а также отверстия для установки горелок, если выработочный бассейн имеет самостоятельное отопление.

Стены пламенного пространства выкладываются из огнеупорных материалов (диасса, электроплавленых и др.), толщину стен принимают 380–500 мм. Главный свод печи сооружают из диасовых фасонных брусьев, толщину свода предусматривают в зависимости от ширинмы пролетов 300–400 мм. Кладку свода и стен ведут на растворе с минимальной толщиной ивов (1,5–2 мм). Кладку свода ведут отдельными секциями длиной 5–6 м, оставляя между ними температурные швы 50–100 мм, которые тщательно закрывают и после выработки заделяют.

Стены и главный свод пламенного пространства подвешивают на металлических колоннах (вертикальных колоннах печи), распор свода воспринимается связями.

Опорные прогоны подвесных стен (лафеты) и главного свода опирают на кирпичные, которые крепят к стойкам печи. Стойки печи также воспринимают давление стекломассы в печи.

Для устойчивости главного свода в печах с попеченным направлением пламени стрелы подъема свода принимают 1,8–1,9 пролета,

в печах с подковообразным направлением пламени (горелки расположены в торцевой сцене) – 1,7–1,8 пролета.

Загрузка шихты. В большинстве печей неспиральный действием загрузка шихты механизирована. Порошкообразную шихту и бой загружают через отверстия в торцовой стене или в кармане печи. Карман печи располагают у торцовой стены в печах с попеченным направлением пламени и по продольной стене (боковой) в печах с подковообразным направлением пламени. Обычно карман печи представляет собой выступы бассейна, ширина которого зависит от производительности шихты печи. Схема загрузочных устройств печи представлена на рис. 77, а–ж.

Для загрузки шихты и боя используют плосковые, плужерные, толкательные, роторные, вибрационные и другие устройства. Шихта и бой из составного цеха поступают в бункера хранения, установленные над загрузчиками. Число загрузчиков зависит от производительности печи.

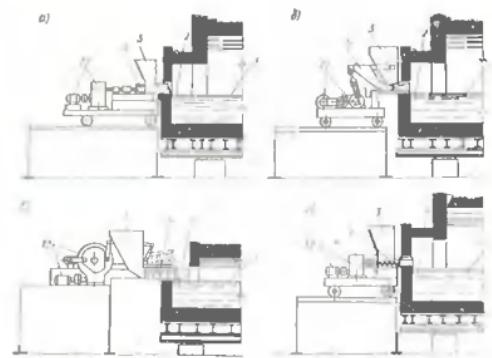
Порошкообразная шихта и бой из бункеров с помощью загрузчиков подаются на зеркало стекломассы.

Наиболее рациональным способом загрузки печи следует считать загрузку увлажненной шихты внеремежку с дробленым боком в виде мелких куч, которая позволяет увеличить площадь теплообмена и интенсивно прогреваться шихте сверху и снизу. Для уменьшения потерь теплоты, улучшения условий обслуживания загрузчиков, исключения пыления шихты и боя подвергают предварительной термической обработке, которая пропаривает ее во фритте. Применение такой шихты позволяет увеличить производительность печей. Однако использование фриттованной шихты усложняет конструкцию печи. Для поддержания постоянного уровня стекломассы в печах загрузчики шихты связаны автоматически с уровнемером.

В последние годы нашли широкое применение роторные загрузчики, которые подают шихту на непрерывный слой боя. В печах малых размеров наибольшее распространение получили плужерные и пневмические загрузчики.

Горелки ванных печей. Такие горелки предназначены для подвода горючего газа и воздуха, их смешивания, организации факела и направления его в пламенное пространство печи. Горелки должны обеспечить получение факела определенной длины (в зависимости от ширины печи), настальность и возможность получения заданных температур для передачи требуемого количества теплоты.

Горелки ванных регенеративных печей, отапливаемых вытескательным топливом, представляют собой канилы, по которым топливо подводят с торца или снизу под углом к потоку воздуха, поступающий от генераторов. Топливо подводят в камеру предварительного смешивания с торца, сбоку в «щечках» или снизу горелок (рис. 78, а–г). Для улучшения смешивания газа и воздуха и направления факела на поверхность стекломассы уклон верхнего



та горелки и арки влета следует выполнять под углом 20–25°. Скорость воздуха в вертикальных каналах в печах с поперечным направлением пламени должна быть 3–4 м/с и в печах с подковообразным направлением пламени 5–7 м/с. Скорость воздуха в горизонтальных каналах составляет 6–8 м/с. Скорость смеси газа и воздуха (ω, м/с) по влетам горелок определяют по формулам Д. Б. Гинзбурга [III]

для печей с поперечным и продольным направлениями пламени

$$\omega = (4 \div 6); \quad (43)$$

для печей с подковообразным направлением пламени

$$\omega = (7 \div 9); \quad (44)$$

где l — расстояние между влетами в печах с поперечным направлением пламени и расстояние от влета до ограждения в печах с подковообразным направлением пламени, м.

Конструктивные схемы горелок ванных печей показаны на рис. 79, 80. В ванных печах с поперечным направлением пламени площасть влетов горелок составляет примерно 2,5–4%, а с подковообразным направлением пламени — 1,5–2% площади отапливаемой части печи.

В печах прямого нагрева применяют двухпроводные горелки пылевого смесивания. Расстояние между горелками составляет 800–1000 мм.

Протоки. Применение протоков или других разделительных устройств по стекломассе позволяет отбирать охлажденную, хорошо проваренную стекломассу с нижних слоев, уменьшить изврзтизие

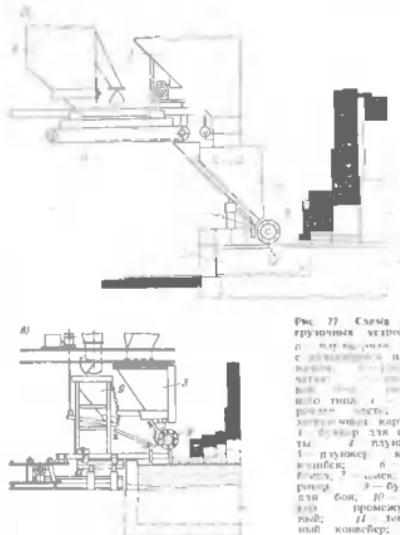


Рис. 77. Схема за круговых устройств
а — горелка; б — с вибрационной панелью; в — с конвектором; г — вентилятор; д — заслонка; е — вибратор для шнеков; ж — шнек; з — вибратор для конвектора; и — горелка; к — вибратор для бункера для боя; л — вибратор для промежуточной топки; м — топочный коминер; н — мотор с редуктором

потоки, повысить производительность печей. Схемы протоков показаны на рис. 69.

Применение той или иной конструкции протока зависит от состава и цвета стекла, а также производительности печи. Незаглубленный проток (см. рис. 69, а, б, с, ж) используют при варке цветных стекол, подубовых с удельными съемами 330–1500 кг/м², с удельным съемом 1800–2000 кг/м² применяют заглубленный проток (см. рис. 69, в, д), усиливающий охлаждение стекломассы. Кладки протока осуществляют из электроплавленных огнеупоров.

Нашинные каналы. Для производства листового стекла методом вертикального вытягивания используют каналы непосредственного питания машин стекломассой. Схемы машинных каналов даны на рис. 81, а–с. Для подачи горячего вытягивания используют компоновку каналов, показанных на рис. 81, а, в, а для беззлодочного — компоновку каналов, представленных на рис. 81, в–с. С целью развития конвективных потоков в подмашинных камерах глубину машинных

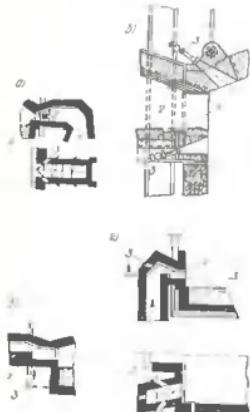


Рис. 78. Схема горелок ванных печей

а — шахтная с боковым вводом газа;
б — с нижним и верхним вводом газа;
в — с вводом газа в ступень горелки;
г — с вводом газа в топку и бокови-
 ным втигательным клапаном; *д* — горе-
 лка с горизонтальным каналом, *е* — с верти-
 кальным каналом; *з* — с вводом газа, *ж* —
 с вводом газа, *и* — с вводом газа, *к* —
 с вводом газа, *л* — с вводом газа, *м* —
 с вводом газа, *н* — с вводом газа, *о* —
 с вводом газа, *п* — с вводом газа, *р* —
 с вводом газа, *с* — с вводом газа, *т* —
 с вводом газа, *у* — с вводом газа, *ф* —
 с вводом газа, *х* — с вводом газа, *я* —
 с вводом газа.

каналов при безлодочном вытягивании принимают 1200—1500 мм, при лодочном вытягивании 600—900 мм.

Ширина каналов зависит от ширины ленты стекла и должна превышать ее на 200—400 мм.

Приспособления для бурения стекломассы. Наиболее важные процессы стекловорения — осветление и гомогенизация, так как от их завершения зависит однородность стекломассы и возможность получения изделий высокого качества. Процесс осветления стекломассы заключается в удалении газовых включений.

Для ускорения процесса осветления могут быть использованы следующие методы: повышение температуры зоны освещения; растягивание зоны варки и освещения; бурление стекломассы — механическое перемешивание; использование мельзилок.

— ванная с боковым вводом газа;
б — с нижним и верхним вводом газа;
в — ванные ваны в ступень горелки;
г — ванные ваны с горизонтальными и вертикальными кранами; — горизонтальный ванец; — ванна под тазом, 4 ванты; 5 ступени.

Бурление стекломассы радиально изменяет характер и скорости протоков, волвская в ширкуляции весь объем стекломассы. По данным исследования Д. С. Веденея [61], при наличии бурления по обе стороны восходящих пузырей возникают два вращающихся вихря (рис. 82, а, б): один направлен к зоне вакуум, другой — к зоне стекла.

При наличии выработки вся стекломасса, поступающая в зону выработки, проходит через завесу пузырей.

По данным исследований В. В. Поляк, З. А. Михайловой-Богданович, К. А. Пчеликовой [61, М. А. Панковой и др., сола следует располагать в один-два ряда. В печах с поперечным направлением пламени и двухщиковкой широколистной рекомендуется первый ряд соли располагать в месте температурного максимума по склонам

се. В проточных печах сопла располагают на расстоянии, составляющем 25—30% длины бассейна (от протока), т. е. в зоне чистого зеркала.

При повышенной варочной способности зоны варки соплы располагают в районе шахтной пены. Расстояния от крайних сопел до боковых стен рекомендуется брать 600—800 мм, между соплами — 400—450 мм. В случае двухрядового размещения сопел их располагают в шахматном порядке на расстоянии между рядами 800—1000 мм.

Для барботирования используют предварительно очищенный и осушенный воздух или кислород. Рядом газа составляет 1,2-2,5 м³/ч, давление на соплах 0,2-10⁶-0,6-10⁶ Н/м², частота выхода пузырей в 1 мин не менее 15-20 и не более 50-60 в зависимости от вида стеклокамассы.

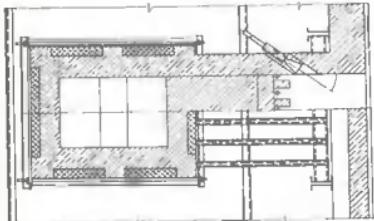
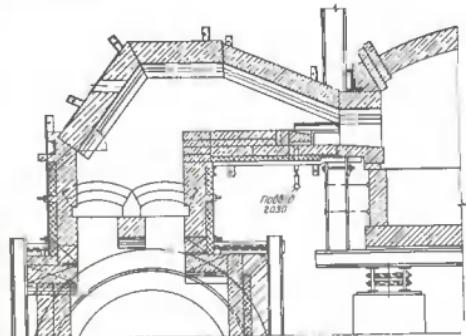


Рис. 24. Конструктивная схема горелки с подводом топлива в ступень горелки

Параметры бурления для различных стекол приведены в табл. 13. Применяют сопла из платины, жароупорных материалов и сплавов (рис. 83, а—е). Сопла располагают вертикально в дне бассейна. В «районе» барботирования стены и дно печей выкладывают из высокостойких плавленых огнеупоров и предусматривают их охлаждение. Схема установки бурления стекломассы показана на рис. 84.

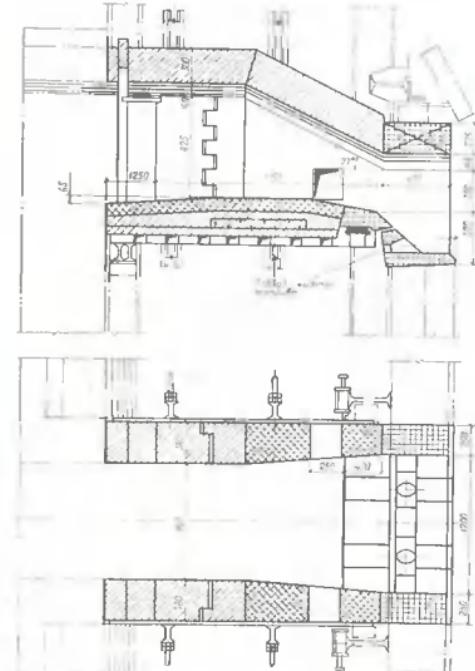


Рис. 84. Схемы горизонтов для южного топлива

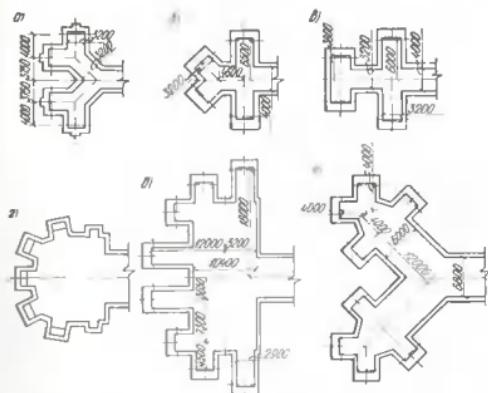


Рис. 85. Схемы каналов
а, б, в — для трех и четырех машин; г, д, е — непосредственным питанием машин

Таблица 13. Параметры бурления для различных стекол

| Стекло | Давление или расход вспомогательной воды на один сопло, Н·м | Число пульсирующих потоков в 1 мин | Диаметр пумпажных |
|-----------------------------|---|------------------------------------|-------------------|
| Темно-зеленое | $(0.2-0.6) \cdot 10^5$ | 15-20 | ≈ 150 |
| Полубелое | $(0.4-0.5) \cdot 10^5$ | 50-60 | 200-250 |
| Бесцветное нейтральное | $(0.25-0.3) \cdot 10^5$ | 35-40 | — |
| Бесцветное щелочное | $(0.2-0.5) \cdot 10^5$ | 20-40 | 100-150 |
| Бесцветно-магниево-литичное | $1.4-2.5 \text{ м}^3/\text{ч}$ | — | — |
| Бесцветное бориевое | $(0.3-0.1) \cdot 10^5$ | — | 150-200 |

РАСЧЕТ ВАННЫХ ПЕЧЕЙ

Тип печи выбирается в зависимости от состава стекла, вида и ассортимента вырабатываемых изделий, заданной производительности печи, способа выработки вид топлива. Площадь варочного бассейна (отапливаемой части) ванных печей непрерывного действия определяют на основании их общей производительности по стекломассе и удельному объему стекломассы.



Рис. 82. Конвективные потоки стекломассы
а — без бурления; б — с бурлением (кривые температур t_1 — без бурления; t_2 — с бурлением)

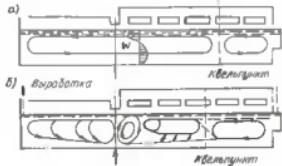
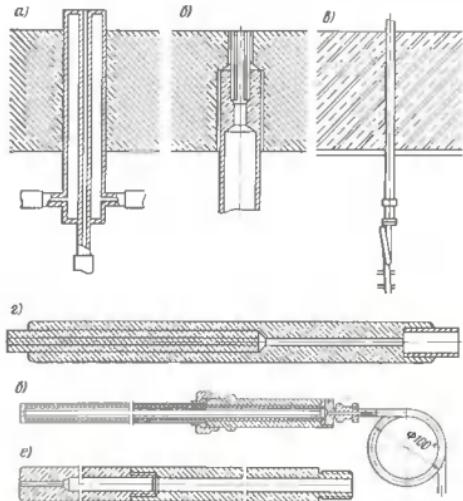


Рис. 83. Импульсы сокола в схемах установок вдува печи
а — вододжетное; б — с магнитным коллектором; в — с конвективным коллектором; г — кирзовое с короткой рабочей частью; д — кирзовое



Удельный съем ванных печей по эксплуатационным данным составляет для листового стекла 0,8—1,5 т/(м²·сут); наибольший съем соответствует содовой шихте; для тарного стекла (печи с про-

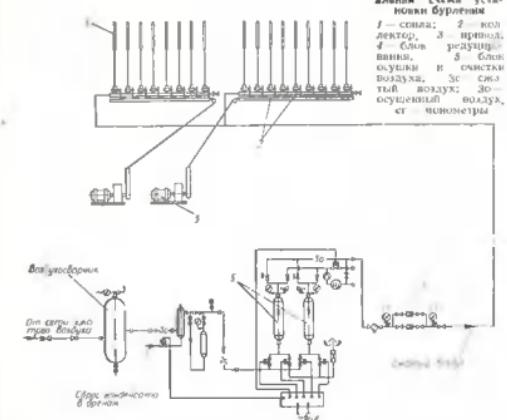


Рис. 84. Принципиальная схема установки бурления
1 — сопло; 2 — вал диктора; 3 — привод; 4 — блок регулирования; 5 — сопло охлаждения и смеси воздуха; 6 — сжатый воздух; 7 — дозирующий воздух; 8 — манометры

током) 1,5—2,5 т/(м²·сут); для электровакуумного и сортового стекла (печей с протоком) 0,5—1,5 т/(м²·сут). Удельный съем стекломассы зависит от средней температуры варочной части и составляет по данным, приведенным ниже:

| Средняя температура, °С | 1300 | 1370 | 1420 | 1470 | 1500 | 1540 | 1600 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Удельный съем, т/(м ² ·сут) | 0 | 0,35 | 0,7 | 1,05 | 1,5 | 2 | 3 |

Площадь отапливаемой части печи (зоны варки и осветления в м²) определяют по формуле

$$F_B = G \cdot q_B, \quad (45)$$

где G — производительность печи по стекломассе, кг/сут; q_B — удельный съем стекломассы кг/(м² · сут).

Удельный съем стекломассы зависит от средней температуры варки стекла и составляет для листового стекла 800—1500 кг/(м²·сут), для тарного стекла (в печах с протоком) 1500—2500 кг/(м²·сут).

Размеры студочной и выработочной частей бассейна зависят от конструкции печи, способа выработки и схемы стекломассы. Для печей листового стекла площадь зеркала студочной части составляет 50–150 % площади варочной части. В печах с протоком размеры выработочной части преимущественно определяют расположением оборудования для выработки стекломассы. Площадь зоны варки должна быть достаточна для восприятия теплоты стекломассой. Основная часть теплоты поступает из пламенного пространства и воспринимается поверхностью пичты, а часть передается ниже снизу конвекционным потоком стекломассы (10–20%), поступающего из зоны освещения.

Площадь зоны освещения также должна обеспечить восприятие теплоты, необходимой для нагрева стекломассы до температуры, при которой освещение и гомотензизация протекают с достаточной скоростью (1470–1530 °C).

Длина и ширина печей зависят от площади варочного бассейна и от организации процесса горения. Минимальную ширину печей с попечным направлением пламени принимают 4 м (равной минимальной длине факела), максимальную — 9–10 м; в печах с подковообразным направлением пламени отношение длины печи к ее ширине составляет 1 : 1–2. В печах с продольным направлением пламени ширина составляет 4–5 м, длина варочной части 4–7 м.

Глубину варочного бассейна определяют по технологическим условиям: для печей листового стекла 1,2–1,5 м, для печей с протоком прозрачного стекла 0,7–1,2 м; малопрозрачных сортов стекла 0,5–0,6 м.

Размеры пламенного пространства в печах с попечным направлением пламени определяют расстоянием от уровня бруса бассейна до верха нижнего горелочного бруса (150–200 мм), размерами влета (350–500 мм), толщиной арки влета (300 мм), подъемом свода (800–1100 мм). Общая высота пламенного пространства составляет 1500–2000 мм.

Высоту подъема свода принимают $1_{t_1} - 3_{t_2}$ ширины пламенного пространства печи.

Число печей N определяют по требуемой производительности печей в год G_1 , т, числу рабочих дней в году n , сут, и производительности одной печи G_2 , т/сут:

$$N = G_1 / n G_2. \quad (46)$$

Расход топлива определяют методом теплового баланса или по практическим данным.

Приближенный расход теплоты $|k\text{Дж}(\text{м}^2 \cdot \text{ч})|$ для регенеративных и рекуперативных печей можно определить по формуле Д. Б. Гинзбурга [11]

$$Q = (Pn - W k_2) (1 - e_1 k_3). \quad (47)$$

где P — съем стекломассы, м^2 ; n — расход теплоты на получение стекломассы при температуре выработки, $\text{kДж}/\text{кг}$; $k_1 k_2$ — доля теплоты, теряемой отходящими газами; принимают $k_1 k_2 = 0,25$; k_3 — коэффициент, характеризующий изменение потерь теплоты в окружающую среду с изменением температуры в печи (при температуре 1400 °C $k_3 = 0,1$); W — потери теплоты в окружающую среду, $\text{kДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Значения n , k_2 , k_3 определяют по рис. 85, значение W — по рис. 61. Полный расход теплоты на печь Q_n , $\text{kДж}/\text{ч}$,

$$Q_n = QF, \quad (48)$$

где F — площадь отапливаемой части печи, м^2 .

Для печей прямого нагрева общее потребление теплоты Q , $\text{kДж}/\text{сут}$, может быть определено по эмпирической формуле

$$Q = [(113,2 - 1,77) + 10,77] 10^6, \quad (49)$$

где F — площадь варочного бассейна, м^2 ; T — съем стекла, $\text{т}/\text{сут}$.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Температура газов, выходящих из рабочего пространства печи, составляет 1500–1600 °C. Теплоту отходящих газов используют для подогрева воздуха, генераторного газа, получения пара или подогрева воды. Для использования теплоты отходящих газов предусматривают теплообменные устройства периодического действия — регенераторы, теплообменные устройства непрерывного действия — рекуператоры.

Использование теплоты отходящих газов повышает тепловой коэффициент полезного действия печей, позволяет получить необходимые температуры в рабочем пространстве печей. Преимущественное распространение получили регенераторы.

Регенераторы. В регенеративной системе воздух и низкокалорийный генераторный газ подогреваются до температуры 1000–1200 °C.

Регенераторы представляют собой камеры, внутри которых имеется насадка, выполненная из кирпича. Схема регенераторов представлена на рис. 86, а—е. Различают вертикальные горизонтальные регенераторы. В вертикальных движение льямовых газов происходит сверху вниз, воздух — снизу вверх (рис. 86, а—д), в горизонтальных — движение газов горизонтальное (рис. 86, е).

В основном используют вертикальные регенераторы, реже — горизонтальные.

В вертикальных регенераторах по сравнению с горизонтальными насадка имеет меньшее сопротивление, более равномерное распределение газов по сечению насадки и может быть легче заменена.

Горизонтальные регенераторы имеют небольшую строительную высоту и в связи с этим их можно применять при наличии высокого уровня грунтовых вод.

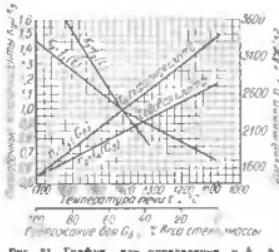


Рис. 85. График для определения k_1 , k_2 , k_3

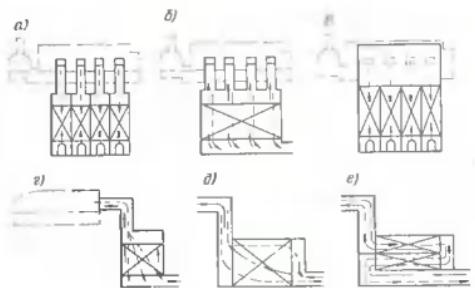


Рис. 58. Схемы регенераторов

вертикальный; а — секционный, б — однолегкий, в — секционный щелевого типа; г — для печи с подковообразным пламенем; д — горизонтальный, е — однодоходовой, ж — двухходовой

В последнее время получили распространение секционные вертикальные регенераторы (см. рис. 86, а, в). Они имеют некоторое преимущество по сравнению с регенераторами с общей камерой: в секционных регенераторах можно менять насадки без нарушения работы печи, лучше омыvаются газами, кроме того, можно создавать более высокую температуру подогрева воздуха (на 100—150° С).

В ванных печах с поперечным направлением пламени регенераторы располагают вдоль продольных стен, в печах с подковообразным направлением пламени — с их торца.

Насадка регенераторов. Для кладки насадки регенераторов применяют шамотный, высокоглиноземистый и термостойкий магнезитовый кирпичи. Насадка из магнезитового кирпича выдерживает температуру до 1400° С и имеет высокую устойчивость и длительный срок службы. Кирпич укладывают на ребро. Способы кладки насадки: сплошными вертикальными каналами или горизонтальными каналами, чередующимися рядами с перебивкой и без перебивки рядов (рис. 87, а—ж).

Наибольшее распространение получила несмещенная насадка (Сименса) ввиду меньшего засорения и насадка с чередующимися рядами и расположением кирпичной вразбежку (Лихте). При кладке насадки по Лихте значительно увеличивается поверхность нагрева за счет вертикальных плоскостей.

Для кладки насадки используют кирпич размерами 250×124×65 и 300—500×150×65—75 мм. Свободное сечение насадок составляет 55—60% объема камеры. В ванных печах высота насадки вертикальных регенераторов составляет 5—8 м, ширина — до 4 м, в горшковых печах высота — до 3 м. Каналы под насадкой перекры-

вают отдельными арками толщиной 300, шириной 150 мм. Расстояние между отдельными арками 150 мм.

Расчет регенераторов. Регенеративная насадка попеременно нагревается и охлаждается. Пламя переводят через 25—30 мин.

Расчет регенератора сводится к определению коэффициента теплонередачи насадки, поверхности нагрева, температуры дымовых

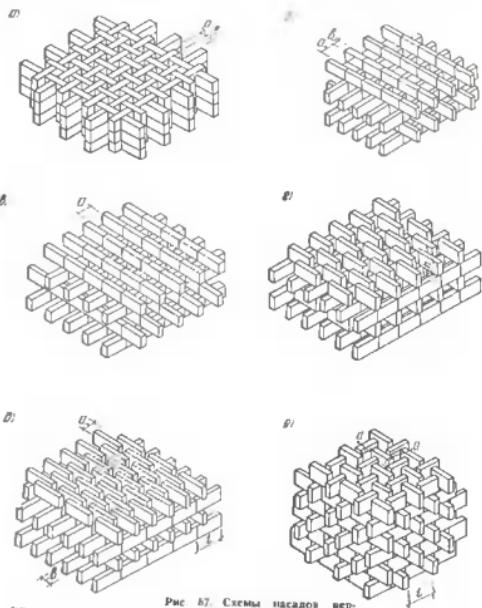


Рис. 59. Схемы насадок вертикальных регенераторов

а — со сплошными каналами; б — с чередующимиися рядами горизонтальных ходов (несмещенные); в — с горизонтальными рядами, с перебивкой ходов (несмещенные); г — с горизонтальными рядами и расщепленными ходами; д — с горизонтальными рядами и перебивкой ходов с чередующимися рабочими кирпичами; ж — с горизонтальными склонающими каналами

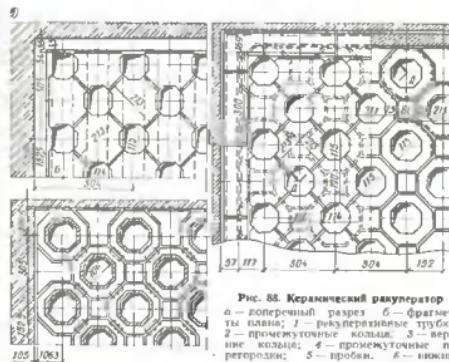


Рис. 88. Керамический ракоуператор
 а — копречистый разрез; б — фрагменты плавки; 1 — рекуперативные трубы; 2 — промежуточные колпаки; 3 — верхние колпаки; 4 — промежуточные перегородки; 5 — пробки; 6 — нижние колпаки; 7 — верхние перекрывающие плавки; 8 — песчаный затвор

где κ — тепловой коэффициент теплообмена, отнесенный к периоду времени, аккумулированной насадкой и $Bt / (m^2 \cdot ^\circ C)$; $Q_{пер}$ — количество отдаваемой воздуху за период времени, Bt .

$$Q_{\text{REP}} = V_B (i_B^2 - i_B^1),$$

где V_B — количество воздуха, м³ пер.; i_1° и i_2° — энталпия воздуха соответственно при начальной и конечной температуре, КДж/м³; $\Delta t_{ср}$ — средняя разность температур, °С.

Итоговый коэффициент теплообмена за период принимают как средний коэффициент теплообмена насадки

$$\mu = (\mu_B + \mu_H)/2,$$

где x_B и x_H — итоговые коэффициенты теплообмена верха и низа насадки регенератора.

Итоговый коэффициент теплообмена определяют по формуле

$$\gamma = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{H}_2\text{II}}} + 4q \frac{r}{\lambda T_0} + \frac{3.6}{rpch} + \frac{1}{\alpha_{\text{O}_2\text{Tox}}}}, \quad (51)$$

где α_1 — коэффициент теплоподачи от дымовых газов к насадке, $Bt/(m^2 \cdot ^\circ C)$; $\alpha_2 = \alpha_1 + \alpha_{20}$, α_{20} — коэффициент теплоподачи от насадки в воздуху; $Bt/(m^2 \cdot ^\circ C)$; λ_0 — продолжительность нагрева и охлаждения насадки, ч; $t_0 = t_1 + t_{ок}$, t_1 — коэффициент теплоизводности кирпича насадки, $Bt/(m \cdot ^\circ C)$; t — линейный размер часть кирпича, участвующего в теплопередаче, см; при толщине кирпича 65 см $t = 0,0325$, φ — безразмерный коэффициент, учитывающий участие массы кирпича в теплообмене; $\psi = 1/4$; b — отшение температурных перепадов в кирпиче при нагреве и охлаждении, $b = 50$; ρ — плотность кирпича, kg/m^3 ; c — средняя теплоемкость кирпича, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$.

$$f = Q_{\text{eff},\nu} \times \mathbf{A}_{\text{eff},\nu}, \quad (50)$$

Температуру дымовых газов на выходе из регенератора определяют из уравнения теплового баланса.

Определив поверхность нагрева насадки регенератора, определяем объем насадки, м³:

$$V_n = F / f,$$

где f — поверхность нагрева 1 м³ насадки, м².

В соответствии с расположением горелок выбирают длину регенератора и соответственно ширину. Для ванных печей поверхность нагрева насадки составляет 20—30 м², или 1,1—1,8 м³ на 1 м² варочной части.

Рекуператоры. В связи с высокой температурой отходящих газов в печах (1400—1500° С) для подогрева воздуха применяют керамические противоточные рекуператоры, допускающие подогрев до 800—1000° С. На печах прямого нагрева применяют радиационные рекуператоры, допускающие подогрев воздуха до 400—500° С.

Керамические рекуператоры. Их кладку осуществляют из фасонных трубчатых элементов. При температуре стеки 1400° С используют шамотные фасонные элементы, при температуре 1500° С выше — шамотно-карборундовые или высокоглиноземистые.

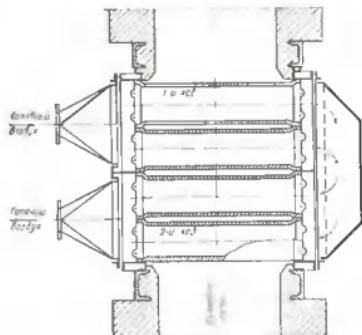
В промышленности в основном применяют вертикальное расположение трубчатых элементов.

На рис. 88, а, б приведен керамический рекуператор, в котором дымовые газы двигаются сверху вниз внутри трубчатых элементов, а подогреваемый воздух омыает эти элементы. Трубчатые элементы воссиянного сечения соединяются между собой специальными вкладышами (кольцами). Для образования каналов, по которым должен перемещаться воздух, между кольцами вставляют промежуточные фасонные перегородки. При кладке керамических рекуператоров особое внимание уделяется уплотнению стыков элементов с целью уменьшения подсоса воздуха дымовым газам. Швы промазывают шамотно-бокситовой замазкой на жидким стекле.

Удельная поверхность керамических рекуператоров составляет 6—12 м²/м³; коэффициент теплопередачи — 2—5 Вт/(м²·°С), скорость дымовых газов в рекуператоре — 0,3—1 м/с, скорость воздуха — 1—2 м/с.

Металлические рекуператоры. Из металлических рекуператоров в промышленности применяют чугунные игольчатые (рис. 89), чугунно-стальные типа «Термоблок», стальные трубчатые, радиационные (рис. 90). Игольчатые рекуператоры могут быть использованы на небольших печах с температурой дымовых газов 700—1000° С. Элементом игольчатого рекуператора является игольчатая чугунная труба длиной 880—1640 мм. Коэффициент теплоотдачи составляет 75 Вт/(м²·°С). Рекуператор типа «Термоблок» состоит из гладких стальных труб диаметром 12—19 м, стенки которых защищены чугунной броней. Коэффициент теплоотдачи составляет 10—25 Вт/(м²·°С).

Рис. 89. Двухходовой игольчатый рекуператор



Для печей прямого нагрева с температурой отходящих газов 1000—1200° С нашли применение радиационные рекуператоры (труба в трубе) (см. рис. 90). Дымовые газы движутся по внутренней трубе с малой скоростью, воздух — по кольцевому межтрубному пространству со скоростью 20—30 м/с. Температура подогрева воздуха при этом составляет 350—400° С.

Расчет рекуператоров. Для расчета рекуператора пользуются уравнением теплообмена

$$Q = K \Delta t,$$

где Q — количество теплоты, передаваемой от дымовых газов воздуху; Bt ; K — коэффициент теплопередачи, $Bt/(m^2 \cdot ^\circ C)$; F — поверхность рекуператора, м²; Δt — средняя разница температур между дымовыми газами и воздухом, °С.

Из уравнения определяют поверхность нагрева $F = Q/K\Delta t$.

Коэффициент теплопередачи K определяют по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^E} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha^W}}. \quad (53)$$

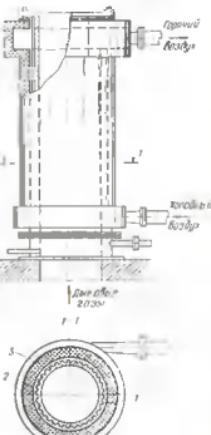


Рис. 90. Радиационный рекуператор
1 — внутренняя труба; 2 — наружная труба; 3 — гофроволнистый

где α^A — коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке рекуператора, Вт/(м² · °С); α^B — коэффициент теплоотдачи от стенки рекуператора к воздуху, Вт/(м² · °С); $\delta\lambda$ — тепловое сопротивление стенок рекуператора.

При определении α^B учитывают излучение и конвекцию

$$\alpha_k^B = \alpha_{k,1}^B + \alpha_{k,2}^B, \quad (54)$$

где $\alpha_{k,1}^B$ — коэффициент теплоотдачи конвекции от дымовых газов к стенке, Вт/(м² · °С); $\alpha_{k,2}^B$ — коэффициент теплоотдачи излучением от дымовых газов к стенке, Вт/(м² · °С).

Для металлических рекуператоров можно пренебречь величиной $\delta\lambda$, тогда

$$K = \alpha^B \alpha^P (\alpha^A + \alpha^B). \quad (55)$$

Для керамических рекуператоров требуется проверка термической устойчивости стенок труб рекуператора по формуле

$$K (t^A - t^B) \delta \leq 8200, \quad (56)$$

где t^A , t^B — температура соответственно отходящих газов и воздуха в проверяемой точке, °С; δ — толщина стеки, см; K — коэффициент теплопередачи на промежуточном участке, Вт/(м² · °С).

Котлы-утилизаторы. Температура отходящих газов за первоходовыми клапанами регенеративных печей или за рекуператором составляет 380–400 С, их энталпия — 20–30% вводимого тепла. Особенно высокая температура отходящих газов у печей прямого нагрева (1100–1200 С).

Для использования теплоты отходящих газов за печами устанавливают котлы-утилизаторы или контактные водонагреватели. Котлы-утилизаторы или водонагреватели используют не менее 50%

теплоты отходящих газов. Температура отходящих газов после котлов-утилизаторов составляет 150–170 С.

Энталпия отходящих газов, поступающих в теплонапользующую установку, может быть определена следующим образом:

$$I_f = V_f c_f t_f, \quad (57)$$

где I_f — энталпия отходящих газов, кДж/кг; V_f — объем газов, поступающих в теплонапользующую установку, м³/ч; c_f — средняя приведенная теплоемкость газов, кДж/(м³ · °С).

Для ориентировочных расчетов может быть использовано выражение

$$c_f = 1,33 + 0,0001 t_f. \quad (58)$$

Здесь t_f — температура газов перед теплонапользующей установкой, °С.

Схема установки котлов-утилизаторов за регенеративными печами представлена на рис. 91.

Котлы-утилизаторы устанавливают на байпасе. Система газоходов позволяет с помощью приборов регулировать расход дымовых газов и производительность котла. Котлы питаются химически очищенной водой. На поверхности нагрева котла отлагаются частицы шихты, уносимые из печи дымовыми газами. Для их очистки предусматривают систему обдува дымогарных труб скатым воздухом или паром. Опыт эксплуатации котлов-утилизаторов на заводах по производству технического стекла, установленных за крупногабаритными регенеративными печами (при производительности каждой печи примерно 300 т/сут), показал целесообразность их применения. Наличие котлов-утилизаторов позволяет получить 4–6 пары за 1 ч. Полученный пар и горячую воду используют для производственных и бытовых нужд.

§ 23. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ПЛАМЕННО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕЧИ

В последние годы значительно увеличилось число печей, в которых для варки стекла используется электроэнергия, а также электроподогрев.

Электрические стекловаренные печи перед пламенными обладают некоторыми достоинствами: они просты по устройству, имеют меньшие габариты собственно печи из-за отсутствия регенераторов или рекуператоров, каналов, переводных устройств и дымовой трубы; для них характерны неизначительные потери теплоты в окружающую среду, отсутствие потери теплоты с отходящими газами, возможность полной автоматизации теплового режима, достижение теплового коэффициента полезного действия до 60–70%. При варке стекла в электропечах не происходит уноса шихты и значительно уменьшается улетучивание отдельных компонентов. Все это, вместе взятое, позволяет выбирать стекло высокого качества. В электростекловаренных печах допускается развитие высоких температур собственно в стекломассе без увеличения температуры клашки.

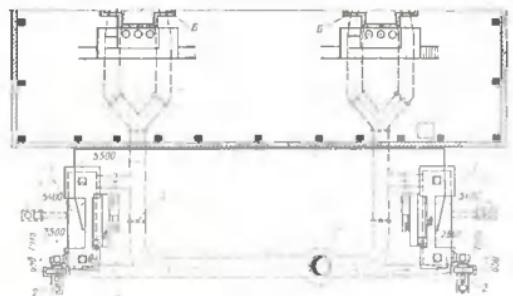


Рис. 91. Схема установки котлов-утилизаторов за регенеративными печами
— котел-утилизатор; — электрический излучатель; — излучение; — конвекция; — стекловаренные печи.

Электрические печи разделяют на дуговые, высокочастотные и печи сопротивления.

В дуговых печах нагрев происходит от дугового разряда между стекломассой и электродом (прямого действия) или между электродами (косвенного действия). Дуговые печи имеют ограниченное применение ввиду того, что при использовании графитовых или угольных электродов происходит загрязнение и окрашивание стекломассы продуктами их разложения.

Высокочастотные печи — печи одногоршковые периодического действия. Различают: а) печи прямого нагрева; нагрев шихты и стекла происходит за счет диэлектрических потерь; б) печи косвенного нагрева; нагрев шихты и стекла происходит выхревыми токами, возникающими вне стекломассы.

В печах прямого нагрева холодная шихта помещается в переменное электрическое поле, в печах косвенного нагрева предварительно нагретая шихта помещается в магнитное поле.

Высокочастотные печи применяют для производства оптических, тутоплавких и технических стекол. Мощность высокочастотных установок составляет 100—200 кВт.

Печи сопротивления подразделяются на печи прямого действия и печи косвенного действия. Печи косвенного действия применяют при выработке стеклянного волокна, кварцевого стекла, стеклонемента. Для нагревателей используют платиновые сплавы, вольфрам и графит.

В печах прямого действия теплота выделяется непосредственно в стекломассе. Электростекловаренные печи промышленного назначения являются печами прямого действия (рис. 92, а — е).

Технологическими особенностями варки стекла в электрических печах являются выделение теплоты в стекломассе, что обуславливает необходимое распределение температуры по глубине печи, при этом максимальная температура находится на уровне электродов, процессы силикато- и стеклообразования протекают в вертикальном направлении.

Наличие мощных вертикальных конвекционных потоков обуславливает удельный съем стекломассы почти вдвое больше, чем в пламенных печах. Производительность печей прямого нагрева достигает до 100 т/сут.

Принята следующая классификация электрических печей [25].

I. По направлению производственного потока по отношению к направлению процесса варки печи могут быть:

вертикальными; в таких печах направление производственного потока совпадает с направлением процесса варки, горизонтальными; в этом случае производственный поток по отношению к процессу варки направлен вертикально.

II. По расположению электродов в отношении к производственному потоку выделяют печи с продольным расположением электродов; печи с поперечным расположением электродов; печи с продольно-поперечным расположением электродов.

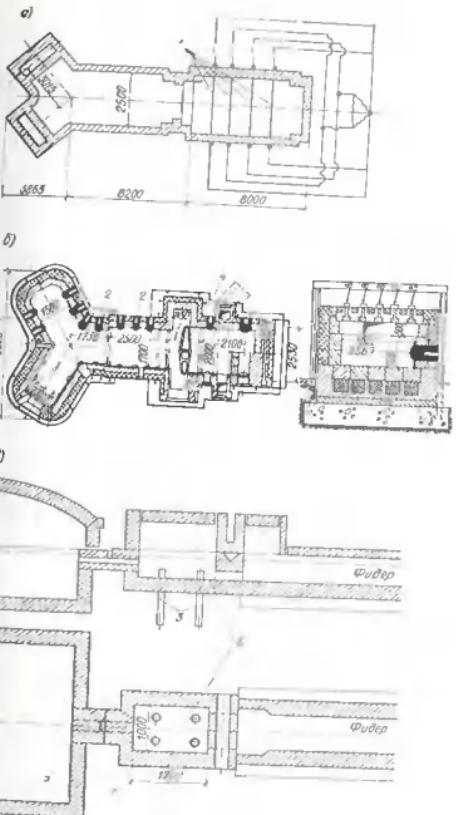


Рис. 92 Электростекловаренные печи прямого действия

а — для листового стекла (печь Борзая); б — печь с охлажденными стальными электродами; в — печь с осветлительной ячеейкой; электроэлементы: 1 — Графитовые; 2 — стальные; 3 — молибденовые; 4 — зонда; 5 — варочная часть; 6 — осветлительная ячеяка

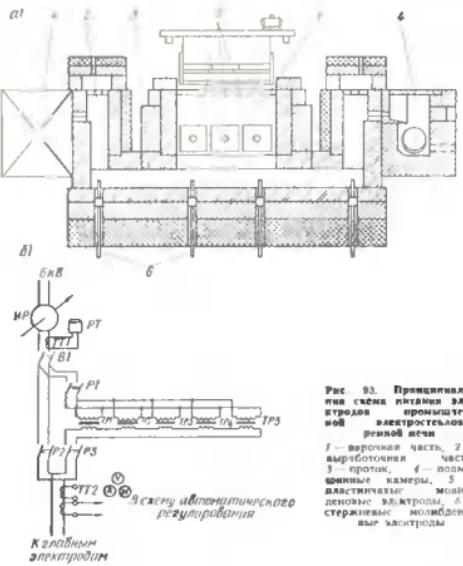


Рис. 93. Принципиальная схема питания электродов горизонтально-электротехнической печи
1 — варочная часть, 2 — выпарочная часть, 3 — проток, 4 — помост, 5 — пластинчатые моноблочные электроды, 6 — стержневые монолитные электроды
Схема автоматического регулирования

III. В зависимости от расположения электродов по отношению к ограждениям стен [39] можно выделить печи: со стержневыми (сквозными и полусквозными) электродами, с пристенными электродами, с вертикальным расположением электродов.

Электростекловаренные печи прямого нагрева могут быть однофазного и трехфазного тока.

К горизонтальным печам относят печь Бореля (см. рис. 92, а), в которой применены сквозные стержневые графитовые электроды, и печь ереванского муллитового завода с охлаждаемыми стальными электродами (см. рис. 92, б). Наибольшее распространение получили вертикальные печи с молибденовыми пластинчатыми электродами (см. рис. 92, в) и молибденовыми стержневыми электродами.

В вертикальных печах (глубинные) шихта распределяется по всей поверхности варочной части, освещенная стекломассой через проток, расположенный у дна печи, поступает на выработку. Для

кладки бассейна печи используют электроплавленые литье огнеупоры.

Вертикальные печи используют для варки и выработки штучных изделий, трубычного стекла. Удельный съем стекломассы в вертикальных печах составляет $2,5 - 3 \text{ t}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$, коэффициент полезного действия — $50 - 60\%$.

Особенно целесообразно применять электрические печи для производства стекол с легучими компонентами: боросиликатных, свинцовых, опаловых и др.

На рис. 93 представлена промышленная печь для варки электровакуумного стекла производительностью 14 т/сут. Характеристика печи: площадь варочной части $5,4 \text{ м}^2$, удельный съем стекломассы $2,6 \text{ t}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$, удельный расход электроэнергии $0,94 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}$, плотность тока на электродах $1,2 \text{ A}/\text{см}^2$.

При варке стекол, содержащих свинцовые соединения, используют окисно-оловянные электроды.

Пламенно-электрические печи. Для интенсификации процессов стекловарения широкое распространение получил электроподогрев в комбинации с пламенным обогревом.

Дополнительный электроподогрев позволяет увеличить производительность печей на $10 - 60\%$, а также улучшить качество стекломассы без изменения схемы процессов стекловарения пламенной печи. Особенно целесообразен электроподогрев в производстве тарного стекла.

Встречается горизонтальное расположение электродов у продольных стен печи (рис. 94) и горизонтальное совместно с вертикальным в дне печи (рис. 95).

Обычно электроды устанавливают в зоне варки, что обеспечивает включение в процесс варки нижних слоев стекломассы, а также в

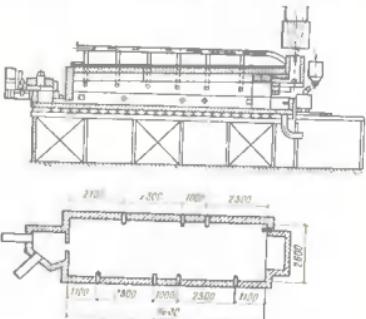


Рис. 94. Газораскарбированная печь с горизонтальным расположением электродов

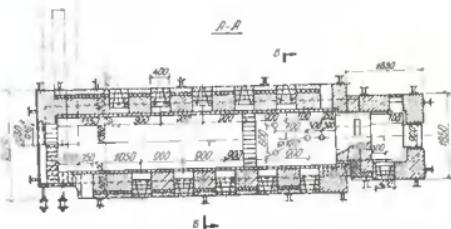
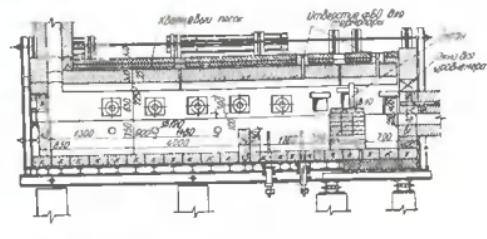
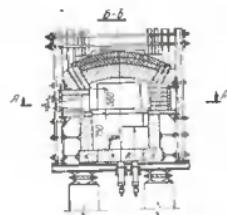


Рис. 95. Газоэлектрическая печь с горизонтальными и вертикальными расположением электродов



Для варки натривно-известковых стекол используют молибденовые стержневые электроды с водяным охлаждением, которые не окращивают стекломассу (в отличие от графита).

Общий расход теплоты на варку стекла при удельном съеме 2 т ($\text{м}^3/\text{сут}$) снижается до 7650 кДж/кг.

Расчет электрических печей. Расчет электрических печей включает тепловой и электрический расчеты. В тепловой расчет входят со-

районе квельпункта для создания условий, препятствующих прохождению непропаренной стекломассы в зону освещения.

Применяют электроды молибденовые и графитовые. Повышение температуры стекломассы, увеличение потока теплоты шахты ускоряет процесс варки.

Установление теплового баланса и определение расхода теплоты по методике, аналогичной и для пламенных печей, с той лишь разницей, что здесь необходимо учесть дополнительный расход теплоты на охлаждение электродов.

Требуемую мощность печи, кВт, определяют по формуле

$$P = K \frac{Q}{3,6 \cdot 10^6}, \quad (59)$$

где Q — количество необходимой теплоты, кДж/ч; K — коэффициент запаса, $K = 1,2 - 1,3$.

По эксплуатационным данным удельный расход электроэнергии составляет в среднем 1,1 — 1,2 кВт·ч/кг.

В электрический расчет входит определение электрического сопротивления стекломассы и параметров тока на электродах. Электрическое сопротивление стекломассы R , Ом, между стержневыми электродами диаметром d и длиной L , см, определяют по формуле

$$R = n_1 n_2 \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{2l}{d}, \quad (60)$$

где n_1 — коэффициент, учитывающий неоднородность стекломассы (по данным И. А. Шкаудикова [25], $n_1 = 1,05 - 1,1$); n_2 — коэффициент, учитывающий распределение электродов по отношению к церкалю стекломассы ($n_2 = 1,3 - 1,4$); l — расстояние между осями электродов, см; ρ — удельное сопротивление стекломассы при данной температуре, Ом·см.

Определяют напряжение и силу тока на электродах:

$$\phi = \sqrt{PR \cdot 10^{-3}}, \quad (61)$$

$$I = P_{\phi} = \sqrt{(P/R) \cdot 10^{-3}}. \quad (62)$$

Допустимая плотность тока составляет на графитовых электродах 0,3—0,6 А/см²; на молибденовых — 0,6—1, А/см².

Электрическое сопротивление стекломассы между пластинчатыми электродами рассчитывают по приведенной формуле [32]

$$R = K_1 K_2 \rho (l/S), \quad (63)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий влияние формы ванны при установке электродов на дно ванны; K_2 — коэффициент, учитывающий удаление электродов от дна ванны (для электродов, установленных на дно, $K_2 = 1$); S — площадь сечения электродов, м²; l — расстояние между электродами, м.

Расположение электродов в ванне показано на рис. 96. В зависимости $h_3/H = 0,1 - 0,8$ K_1 и K_2 вычисляют по эмпирическим формулам:

$$K_1 = h_3 + 0,145 (H/l)^{0,8}, \quad (64)$$

$$K_2 = 1 - 0,0455 (H/h_3) (h_{3a}/H)^{0,328} \quad (65)$$

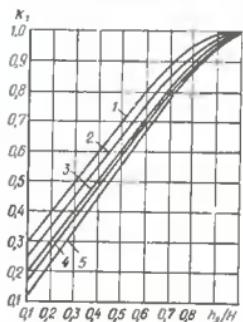
или по графикам (рис. 97, 98).

Электрическое сопротивление стекломассы со стержневыми электродами (расположение показано на рис. 99) может быть рассчитано по формуле

$$R = K_1 \rho (l/h_3 b). \quad (66)$$



Рис. 60. Схема расположения плавающих стеклянных плавников



$$t = \frac{l}{H} = 0,5; \quad z = \frac{l}{H} = 1; \quad x = \frac{l}{H} = 2;$$

$$t = \frac{l}{H} = 0,5; \quad z = \frac{l}{H} = 3$$

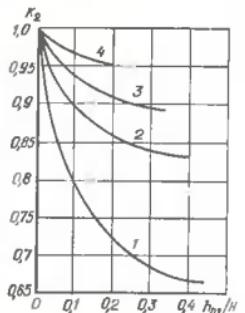


Рис. 88. Значения коэффициентов K_3
 $t = \frac{h_3}{H} = 0,1; 2 - \frac{h_3}{H} = 0,2; 3 - \frac{h_3}{H} = 0,3;$
 $4 - \frac{h_3}{xc} = 0,6$

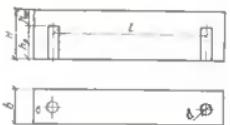


Рис. 90. Схема расположения стержней электродов в прутке

§ 21. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Огжиг в лакалку изделий производят в специально предназнач-
ченных для этого печах, называемых вспомогательными.

По способу отопления такие печи бывают прямого нагрева, муфельными и конвективно-циркуляционными. В печах прямого нагрева теплоизоляция передается изделиям излучением и конвекцией от продукта горения топлива. Движение газов естественное. В муфельных печах передача теплоты изделиям происходит за счет излучения и теплопроводности через стекни муфели. Движение газов внутри чулка естественное, в каналах муфели — принудительное. В современных конвективных конвективно-циркуляционных отжигательных печах передача теплоты изделиям происходит в основном за счет конвекции, излучение газов принудительное. Для отопления печей применяют газ, жидкое топливо, электроэнергию.

Рис. 100. Отжигательный печи

— квадратной; б — пятачковой; в — туннельной мультилань с нижней токкой; г — туннельной мультилань с верхними и нижними токками; д — квадратной трехжильной конфигурации в электрических нагревателях; е — рабочая квадрат; з — квадрат; з подвой горячего газа из продуктов горения; и — отвод продуктов горения; 5 — загрузка изделий; б — электрические нагреватели; 7 — пневматическая система; 8 — вагонетка; 9 — рельсовый путь; 10 — коминдер; 11 — погрузка изделий.

Печи периодического действия. Камерные печи (рис. 100, а). используют для отжига изделий с большой толщиной стенок (более 10 мм) и сложной конфигурацией. В основном применяют камерные печи прямого нагрева.

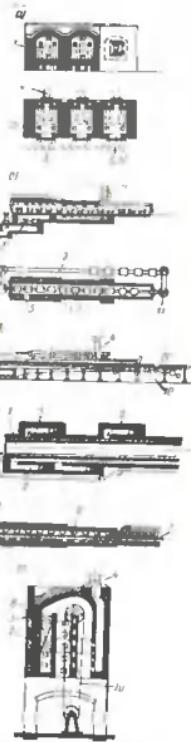
Режим работы печи: разогрев 2—3 ч, укладка изделий 6—7 ч, их отжиг 6—12 ч, выгрузка 3—4 ч. Длительность цикла 16—24 ч. Изделия укладываются на поду или на специальных поставках.

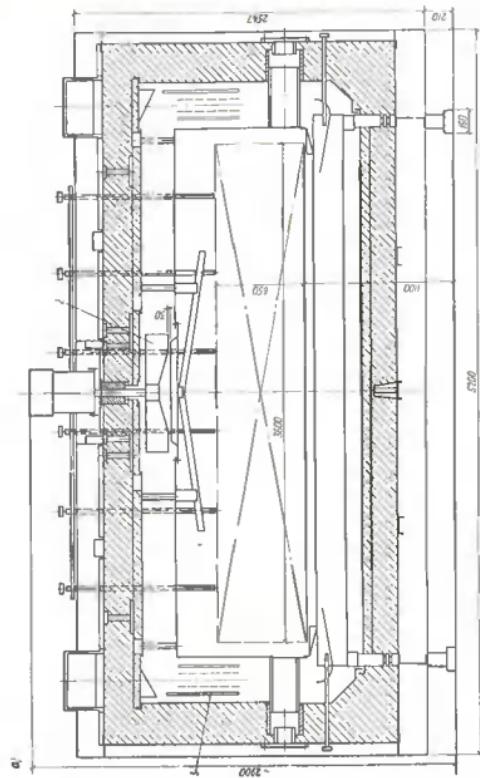
Производительность камерных печей 0,02–1,5 т/сут. Максимальный размер камеры 5×3×1 м, объем, занятый изделиями, 0,6–0,7 объема камеры. Последнее время используют камерные электрические печи, которые позволяют наиболее точно регулировать режим отжига, сократить время отжига и автоматизировать процесс отжига.

Печи непрерывного действия. Затаких печах изделия располагают на вагонетках, сетчатых конвейерах, роликовых толкателях и т. д. По направлению движения изделий непрерывные печи подразделяют на печи с горизонтальным движением и вертикальным.

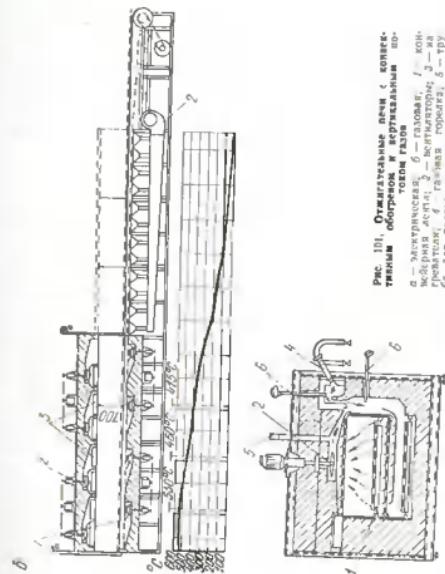
Вагонеточные печи (рис. 100, б) работают по следующему принципу. Вагонетки лежатся по каналу-туннелю, топки для сжигания опилок располагаются в передней части под подом туннеля. Длина туннеля колеблется от 20 до 30 м, высота 0,6—1 м, ширина 1,5 м.

Кузов вагонетки изготавливают из листовой стали или металлической сетки. Расход ткани составляет 4000—12 000 кг/транспортный единиц.





184



185

Рис. 101. Отделительная печь с кореневым обогревом и креплением газовых труб газом:

1 — электрическая печь;

2 — конвекторные трубы;

3 — газовая горелка;

4 — газовая подача;

5 — подставка для газа;

6 — газовая горелка.

Муфельные туннельные печи (рис. 100, в, г) имеют сетчатый коницер, муфель, топки для сжигания топлива: верхнюю и нижнюю и используют на заводах тарного и сортового стекла. Работают такие печи на газообразном, жидкое топливо и электротягии. Муфель изготавливают из карбонатных и пыжомых элементов в зоне высоких температур. Производительность муфельных печей 200–400 кг/ч. Длина печей 18–100 м, ширина 1–4,5 м. Расход тепла 200–5800 кДж/кг изделий.

Роликовая отжигательная печь (рис. 100, д) предназначена для отжига прокатного стекла. Печь представляет собой туннель, внутри которого по валикам движется непрерывная лента стекла. Производительность роликовых печей 50–250 т/сут. Площади пода печи колеблются от 100 до 500 м² и зависят от производительности прокатных машин. Расход тепла 600–2100 кДж/кг стекла.

Основной недостаток вышеуказанных печей – наличие перепада температур по высоте камеры или туннеля, который составляет 3–50°C.

В последнее время широкое распространение получили циркуляционные отжигательные печи (рис. 101, а, б), в которых используется конвективный теплообмен, позволяющий более равномерно распределять температуру по сечению печи и поддерживать необходимую температуру изделий по длине печи. Источник теплоты циркуляционных печей – газообразное топливо и электротягии.

Конструктивно циркуляционные отжигательные печи выполнены из отдельных секций, снабженных хорошей изоляцией. Каждая секция работает по замкнутому тепловому режиму.

Воздух подается в секцию вентилятором, который проходит через электроинагреватель. Движение воздуха вертикальное, что позволяет применять печи с шириной туннеля до 4,5 м. При ширине туннеля более 2,5 м устанавливают два вентилятора. Для ускорения охлаждения изделий используют вентиляторный воздух.

Циркуляционные отжигательные печи полностью автоматизированы. Характеристика таких печей: производительность 1,5–32 т/ч; длина 38–60 м; ширина стеки до 3,6 м, высота над сеткой 0,15–0,45 м; установленная мощность 1000–1600 кВт, число зон автоматического регулирования температуры 17–21.

В цехах, где недостаточно производственные площади, могут быть использованы вертикальные печи (рис. 100, е), которые представляют собой два спаренных между собой канала, по которым движутся листовые коницер. Изделия загружают в люльки, идущие вверх, и выгружают из полок, идущих вниз. Производительность вертикальных печей 1–5 т/с. Расход теплоты 2100–6300 кДж/кг изделий.

Расчет режима отжига изделий ведется по термостойкости в зоне отжига и основан на прямом учете температурных полей в стекле и изделиях. Длительность цикла отжига зависит от толщины изделий, длительности релаксации напряжений и допустимого перепада температур изделий при их нагревании и охлаждении. Расход теплоты

печью определяется по тепловому балансу отдельных периодов или по практическим данным. Размер отжигательного канала определяют по производительности печи, площади, занимаемой изделиями, и по режиму отжига.

§ 25. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Движение газов. Движение воздуха и горючего газа в стекловаренных печах осуществляется в результате напора, создаваемого нагнетающими устройствами, а также геометрического напора, образующегося регенераторах и горелках (рис. 102).

Воздух, как правило, подается под давлением вентиляторами или за счет геометрического напора в переводной клапан или в поднасадочные каналы регенератора.

Высококалорийное топливо – природный газ или жидкое топливо – под давлением поступает в камеру предварительного смешивания горелки или непосредственно в пламенное пространство печи. Горение в пламенном пространстве происходит при малом из-

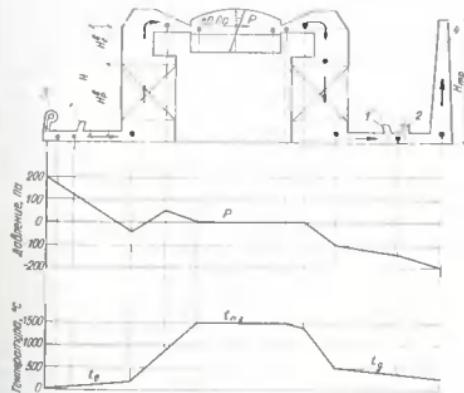


Рис. 102. Движение газов и распределение температур и давлений в стекловаренной печи

— воздушный первичный вспомогательный подающий вентиль; 1 – волнистый первичный клапан в вспомогательной стекле зольных газов; 2 – эжекторный тибр; 3 – вентилический подающий воздуха; 4 – лымянная трубка; Н – высота, определяющая величину геометрического напора; Н_Г – разрежение, поступающее через регенератор; Н_Г – разрежение, возникающее в результате горения; Н_Г – тройное разрежение; Р – разрежение в зоне отжига; t₁ – распределение температуры на пути вдувания; t₂ – распределение температуры на пути дымовых газов; t₃ – температура при выходе из печи

бытке воздуха (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1 - 1,2$). Дымовые газы отводят через дымовую трубу (при естественной тяге) или дымососами и эжекторами (при принудительной тяге).

Давление в пламенном пространстве печи на уровне стекломассы поддерживается близким нулю, что исключает подсос холодного воздуха и охлаждение стекломассы. Давление газов увеличивается по направлению снизу печи. По длине печи оно зависит от технологических требований, предъявляемых к характеру газовой среды.

В основании регенераторов разрежение при прохождении воздуха составляет 40–70 Па. При прохождении дымовых газов через регенератор им приходится преодолевать создаваемый ими геометрический напор, вследствие этого сопротивление на пути движения дымовых газов становится больше, чем на пути движения воздуха, и составляет 60–100 Па.

По направлению к дымовой трубе сопротивление увеличивается и требуемое разрежение составляет 200–300 Па с учетом преодоления геометрического напора, местных сопротивлений и сопротивления трения. По пути движения дымовых газов каналы, регенераторы и клапаны находятся под разрежением, что приводит к подсосу холодного воздуха через неплотности кладки и снижение их температуры.

Теплоизлучение. В стекловаренных печах с газовым отоплением источником теплоты являются продукты горения, которые образуются в рабочей камере печи. Выделяющаяся теплота идет на нагрев шихты, стекломассы и кладки. Таким образом, процесс теплообмена в печи зависит от теплообмена в газовой среде (пламенного пространства) и от теплообмена в слое шихты и стекломассе.

Теплообмен в газовой среде. Основное количество теплоты шихты и стекломассы передается излучением факела пламени (печных газов) и раскаленной кладкой верхнего строения печи.

Излучение пламени зависит от содержания двухатомных газов (CO_2 , I_2O , SO_2) и наличия взвешенных частиц сажи.

Принято считать, что в ванных печах 85–90% теплоты передается излучением.

Роль конвекции незначительна, так как скорость движения газов в пламенном пространстве невелика и составляет 1–4 м/с.

Основным фактором повышения теплообмена является температура пламени и кладки, которая ограничивается максимально допустимой температурой кладки.

Температурное поле в газовом пространстве стекловаренных печей неравномерно, так как нагрев большинства из них производится отдельными факелами, которые состоят из участков с различной температурой. Таким образом, между отдельными факелами, кладкой и стекломассой имеются слои газа с различной температурой, составом и степенью черноты. Неравномерная температура кладки Все указанное обуславливает сложность расчета теплообмена в пламенном пространстве печей. В связи с этим для расчета теплообмена в газовой среде принимают некоторые упрощения. Так, для расчета

количества теплоты, передаваемой стекломассе, пользуются эффективными значениями основных физических параметров [11].

Принимая, что пламенное пространство полностью заполнено факелом в условиях равномерного распределения температуры газового потока, количество теплоты, поглощаемой ванной стекловаренной печи, можно определить по формулам В. И. Тимофеева [10]

$$Q_a = C_{t,h,m} F_m \left[\frac{T_e}{100}^4 - \frac{T_m}{100}^4 \right] \quad (67)$$

где Q_a — количество теплоты, передаваемой материалу, Вт; $C_{t,h,m}$ — принятый коэффициент излучения газов на материал в учете роли печных газов в процессе лучистого теплообмена, Вт $\text{m}^2 \text{ K}^{-4}$

$$C_{t,h,m} = 5,67 \epsilon_r \epsilon_m \frac{q(1-\epsilon_r) + \frac{q(1-\epsilon_r)(1-\epsilon_m)}{F_e F_m}}{5,67 \cdot 10^{-4} \epsilon_r (T_e^4 - T_m^4) F_m} \quad (68)$$

где ϵ_r , ϵ_m — степень черноты газов и материала, T_e , T_m — температура газов и материала, K ; F_e , F_m — поверхность в кладке и материала, q — угловая коэффициент излучения кладки на материал, ϵ_r , ϵ_m — коэффициент теплоты термикса 1 m^2 кладки наружу и получаемый от газов конвекцией, Вт m^2 .

Принимая, что тепловые потери через кладку равны коэффициенту теплоты, которую кладка получает от газов конвекцией ($q_c = q_b$):

$$C_{t,h,m} = 5,67 \epsilon_r \epsilon_m \frac{q(1-\epsilon_r) + \frac{q(1-\epsilon_r)}{q(1-\epsilon_r)[\epsilon_m + \epsilon_r(1-\epsilon_m)] - \epsilon_r}}{q(1-\epsilon_r)} \quad (69)$$

Температуру внутренней поверхности кладки печей можно определить по температуре газов и материала (формула В. И. Тимофеева)

$$T_c^4 = T_m^4 + \frac{\epsilon_r [1 + (1-\epsilon_r) q(1-\epsilon_m)]}{q(1-\epsilon_r) \epsilon_m + \epsilon_r (1-\epsilon_m) + \epsilon_r} [T_e^4 - T_m^4] \quad (70)$$

Температура кладки возрастает с повышением температуры газов и материала, а также зависит от степени черноты газов:

$$\text{при } \epsilon_r = 1 \quad T_c = T_r, \text{ а при } \epsilon_r = 0 \quad T_c = T_m.$$

Расчеты по теплообмену в газовом пространстве печи показывают, что повышение степени черноты факела позволяет снизить температуру газов при одной и той же величине теплоотдачи. Для увеличения количества передаваемой теплоты стекломассе необходимо приблизить факел к зеркалу стекломассы; увеличение температуры в печи повышает ее производительность. В варочной зоне температура поверхности кладки ниже, следовательно, в нее необходимо подавать большие теплоты, чем в зону освещения.

Для расчета теплообмена в стекловаренных печах при наличии отдельных факелов (участков) горения газа могут быть использованы уравнения Н. А. Захарникова [20]. При этом принимается, что объем печного пространства над каждым участком (серединное расстояние между влагами смежных горелок) полностью заполнен газами с одинаковой температурой по высоте печи.

Действительное распределение температуры по высоте учитывает опытным коэффициентом при определении эффективной температуры падения факела.

Результаты измерений теплотдачи показали, что на указанном участке необходимо учитывать только излучение факела кладки, излучение других факелов учитывать не следует.

Таким образом, теплопотдачу первого факела можно определить по формуле

$$Q_{\Phi_0} = \sigma_{1,1}(T_{\Phi_1}^{\frac{1}{2}} - T_1^{\frac{1}{2}})F_1 + \sigma_{2,1}(T_{\Phi_1}^{\frac{1}{2}} - T_2^{\frac{1}{2}})F_2 \quad (71)$$

Ли любого сретшего m -го факела

$$Q_{\phi_m} = \sigma_{m-1, m} (T_{\phi_m}^4 - T_{m-1}^4) F_{m-1}^{-1} \sigma_{m, m} (T_{\phi_m}^4 - T_m^4) F_m^{-1} \sigma_{m+1, m} \\ \times (T_{\phi_m}^4 + T_{m+1}^4) F_{m+1}, \quad (72)$$

где σ — интегральные коэффициенты излучения, учитывающие совместное излучение фонаря и кладки, $\text{Bt}^{\prime} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_{Φ_1} — эффективная температура фонаря, К.

T_{ϕ} находим по формуле В. Н. Тимофеева

$$T_{\mu}^{\lambda} = \tau T_{\mu}^{\alpha} T_{\alpha}^{\lambda} \quad (73)$$

где T_g и T_0 — соответственно теоретическая температура горения и температура отходящих газов, К; χ — эпизентный коэффициент, учитывающий особенности горючей смеси, характерные для стеклопаренных печей, причем $\chi = 0,51$; T_1 — средняя температура поверхности стекломассы данного участка K ; F_1 — площадь чертежа панели участка, м².

Теплодобив в слое шинкты и стекломассы. В пламенных вспышках шинкты и стекломассы нагреваются от излучения пламенного пространства и зачастую от конвекционных потоков стекломассы. Поверхностный слой шинкты быстро нагревается до температуры 1200–1280°C, а сама шинкта обладает малым коэффициентом теплопроводности,

Шихта покрывается тонким слоем расплава, который неизрываю-
щекатся. Этот расплав (шахтная пена), богатый пузырьками, распро-
страняется по свободному зеркалу стеклокамассы зоны варки. По мере
текущего извержения извергается из шахты, находящейся под
ней, и, таким образом, слой шахты уменьшается. Уменьшение
слоя шахты также происходит в результате нагрева ее снизу кон-
вективными потоками стеклокамассы (составляет 10–20%). Под
слоем расплава находится полусыпучая шахта, в которой
преподобно эндотермические реакции с градиентом температур
150–200 С [30]. Схема нагрева шахты, по данным [30], показана
на рис. 103.

Таким образом, прогрев слоя шихты зависит от спекания поверхности слоя. Процесс спликатообразования протекает при температуре 800-1300° С, и мало зависит от температуры пламениного пространства печи.

Стекающийся расплав постепенно нагревается до температуры 1500-1550 С., при которой происходит полное растворение церии кварца и освобождение стекломассы.

Проведенные измерения тепловых потоков показали, что шихта поглощает в 2 раза большее теплоты, чем стекающий расплав, и что чистое зеркало воспринимает 30—40% теплоты [30]. Схема распределения тепловых потоков в печи представлена на рис. 104, а, б.

Из приведенной схемы можно сделать вывод, что количество всепринимаемой теплоты в зоне варки зависит от площади, занятой шихтой и пеной, а также от площади свободного зеркала и температуры пламенного пространства.

Таким образом, наличие чистой поверхности зеркала стекла позволяет осуществить нагрев панели снизу и покрыть потери наружных стен бассейна.

Движение стекломассы в печах. Для получения высококачественной стекломассы требуется поддерживать определенную последовательность процессов и параметров в различных зонах печи.

Большое влияние на ход процессов, протекающих в ванных печах, оказывают потоки стекломассы, которые обусловлены неодинаковой ее плотностью в различных частях печи и съемом стекломассы. Различные плотности стекломассы в печах являются результатом неравномерного распределения ее температуры.

Характер потоков стекломассы зависит от конструкции печи, распределения температур в ней, свойств стекломассы и производительности печи.

В варочном бассейне печи наблюдаются продольные, поперечные, прямые и возвратные потоки стеклохассы (рис. 105).

В продольном направлении образуются два шкала потоков стекломассы: от области максимальной температуры в сторону загруженного кармана и в сторону выброоточного бассейна. В по-перечном направлении печи от оси печи в сторону стены бассейна в поверхностном слое стекломассы и от стены к средней линии слое

Наиболее большое значение имеет продольный поток стекломассы, который способствует ее гомогенизации и усреднению, а также переносу теплоты, необходимой для покрытия потерь в окружающую среду. Наличие продольного потока от зоны максимальной температуры в сторону загрузки печи задерживает появление зон варки и позволяет в зоне извещения иметь чистое зеркало, что оказывает благоприятное влияние на процесс осветления стекломассы.



Рис. 103. Схемы нагрева шихты



Рис. 104. Схема распространения тепловых потоков

А — область санитарного цикла; Б — область выработанного цикла; в — термический межкор; г — чистота зеркала; I — зона шахты; II — зона пены; III — зона охлаждения; IV — зона вспышки распределения тепловых потоков, воспринимаемая стекломассой в вязкой зоне)

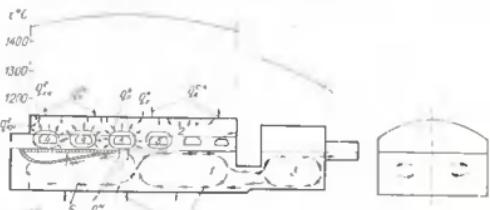


Рис. 105. Схема теплообмена и движения потоков стекломассы

1 — парочный бассейн; 2 — влагомоечное пространство; 3 — выработанный бассейн; 4 — фланец из края паровой зоны; 5 — то же, зона осаждения; 6 — циркуляционный поток в паровой зоне; 7 — то же, в зоне осаждения; q^v — лунистый поток тепла от фланца, q^v_1 — то же от кладки; q^v_2 — от шахты и стекломассы на жалюзи; q^v_3 — от дна в сторону стекломассы; q^v_4 — от стекломассы во дну; q^v_5 — компенсационный поток тепла от газов стекломассы; q^v_6 — от стекломассы в дну.

К кладке, $q_{\text{кл}}^v$ — от талуса в шахте и стекломассе; $q_{\text{шк}}^v$ — поток тепла от кладки в окружающую среду, $q_{\text{шк}}^v$ — то же, от дна; P_0 — зона давления в области загрузки шахты;

P_1 — то же, в области максимальных температур; P_2 — то же, в области выработки;

ω_1 , ω_2 , ω_3 — потери скользящей стекломассы; H_1 , H_2 — высоты соответственно первого и второго слоев стекломассы; ΔH — разность высот слоев стекломассы

жением шамотных поплавков, использованием люминесцирующих индикаторов (двухцветный церия), радиоактивных индикаторов, по характеру разъединения огнеупора, а также с помощью моделей.

Расчет конвективных потоков. В предложенных ранее методах расчета потоков стекломассы не учитывались многочисленные факторы, связанные с неоднородностью условий в работающей печи. Из предложенных уравнений для расчета потоков стекломассы следует указать на метод расчета А. А. Соколова [10], который предложен для расчета потока стекломассы (μ велико и ω мало) применить уравнение движения несжимаемой вязкой жидкости вдоль оси x (продольной оси печи), оси y (ее поперечной оси), оси z (вертикально вниз):

$$dp/dx = \mu (d^2w/dx^2). \quad (74)$$

А. А. Соколов [10] предложил уравнения (табл. 14) для упрощенного расчета потоков стекломассы, выведенные при допущении, что отсутствуют выработанный и поперечный потоки, уровни пейтральных давлений и иудлевые скорости совпадают, распределение температур в стекломассе задано и не зависит от потоков; значения вязкости по длине потока усереднены.

В дальнейшем для решения уравнений по указанному методу [10] предложено использовать метод конечных разностей.

Разработанный метод расчета потоков стекломассы [14] позволяет учесть трение стекломассы о боковые стены, а также фактическое распределение температур, вязкостей и плотностей стекломассы по длине, глубине и ширине печи. Для расчета применен метод конечных разностей, в котором бесконечно малые приращения величин в дифференциальном уравнении заменены их конечными приращениями.

Решение разностного уравнения осуществляется методом прогонки, который позволяет найти решение без потери точности. В основу расчета для прямоугольной трубы тока, проходящей вдоль всего участка, где необходимо провести расчет потоков стекломассы, положено уравнение, выражающее баланс сил, действующих на выделенный объем и направленных вдоль аппликаты

$$f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 = D, \quad (75)$$

где f_1 , f_2 , f_3 , f_4 — сила трения, действующая на выделенный объем стекломассы по границам S_1 , S_2 , S_3 , S_4 ; f_5 , f_6 — силы, действующие на торцевые грани; D — скорость изменения количества движущего выделенного объема стекломассы, которое зависит от изменения плотности (температуры) стекломассы.

Отдельные члены уравнения определяют следующим образом:

$$D = \int_{S_1} \gamma(x, y, z_0) w^2(x, y, z_0) dx dy - \int_{S_1} \gamma(x, y, z_1) w^2(x, y, z_1) dx dy;$$

$$f_1 = \int_{S_1} \int_{S_2} \mu(x + \Delta x, y, z) \frac{dw(x + \Delta x, y, z)}{dx} dz dy;$$

Таблица 14. Формулы упрощенного расчета конвективных потоков стекломассы

| Параметры потока стекломассы | Вертикальные потоки | |
|---------------------------------|--|--|
| | Поток свободной поверхности | При неподвижной поверхности |
| Толщина, м | $h_1 = \frac{H}{1 + \sqrt{\frac{5 \mu_1 (t_{2,1} - t_{1,1})}{\mu_1 (t_{2,2} - t_{1,2})}}}$ | $h_3 = \frac{H}{1 + \sqrt{\frac{\mu_2 (t_{2,1} - t_{1,1})}{\mu_2 (t_{2,2} - t_{1,2})}}}$ |
| Максимальная скорость, m/s | $\omega_1, m/s = \frac{2000 (t_{2,1} - t_{1,1}) H^2}{\mu_1 l}$ | $\omega_3, m/s = \frac{375 (t_{2,1} - t_{1,1}) h_1^2}{\mu_2 l}$ |
| Средняя скорость, м/ч | $\omega_2, \text{ср} = \frac{5}{8} \omega_1, m/s$ | $\omega_4, \text{ср} = 0,1545 \omega_1, m/s$ |
| Расход, m^3/q | $Q = \omega_1, \text{ср} B h_1$ | $Q = \omega_3, \text{ср} B h_3$ |

Приложение H — толщина слоя, м; B — ширина канала, м; μ — вязкость стекломассы, $[N \cdot s \cdot m]$; ω_1, ω_2 — скорость потока в верхней и нижней потоков, m/s ; $t_{1,1}, t_{1,2}$ — средние температуры соответствующих верхнего и нижнего потоков, K ; $t_{2,1}, t_{2,2}$ — то же, по вертикали; 2 , 1 , 3 , 4 — то же, по горизонтали.

$$f_2 = - \iint_{S_2} \mu(x, y - \Delta y, z) \frac{dw(x, y - \Delta y, z)}{dx} dy dz,$$

$$f_3 = \iint_{S_3} \mu(x, y - \Delta y, z) \frac{dw(x, y - \Delta y, z)}{dy} dx dz,$$

$$f_4 = - \iint_{S_4} \mu(x, y, z) \frac{dw(x, y, z)}{dy} dx dz;$$

$$F_1 = \iint_{S_1} P(x, y, z_1) dx dy;$$

$$F_2 = \iint_{S_2} P(x, y, z_2) dx dy.$$

Подставляя в уравнение (75) значения всех входящих в него величин, дели обе части на $\Delta x \Delta y$, а затем перейдя к пределу при $\Delta x \rightarrow 0$, $\Delta y \rightarrow 0$, отбросив член, стоящий в правой части уравнения (75) как незначительный, получим уравнение движения стекломассы

$$\frac{d}{dx} \left[\mu(x, y) \frac{dw(x, y)}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[\mu(x, y) \frac{dw(x, y)}{dy} \right] - F(x, y) = \Delta P, \quad (77)$$

где $\mu(x, y) = \int_{z_1}^{z_2} \mu(x, y, z) dz$ — вязкость в точке сечения

Давление $P(x, y, z)$ можно считать равным массе столба стекломассы над соответствующей точкой (x, y, z) :

$$P(x, y, z_2) - P(x, y, z_1) = g \int_0^x [V(x, y, z_2) - V(x, y, z_1)] dz = \Delta P = F(x, y) - \Delta P. \quad (78)$$

где $w(x, y)$ — скорость в точке сечения; ΔP — избыточное давление, которое не зависит от z и y .

Ниже приведены решения, удовлетворяющие тем же граничным условиям, что и решение $w(x, y)$ уравнения (70):

$$\frac{d}{dx} \left[\mu \left(\frac{dw}{dx} \right) \right] + \frac{d}{dy} \left[\mu \left(\frac{dw}{dy} \right) \right] = F(x, y), \quad (79)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\mu \left(\frac{du^0}{dx} \right) \right] + \frac{d}{dy} \left[\mu \left(\frac{du^0}{dy} \right) \right] = F, \quad (80)$$

Тогда ввиду линейности рассматриваемых уравнений (79), (80) справедливо следующее равенство:

$$w(x, y) = w^0(x, y) - \Delta P u^0(x, y) \quad (81)$$

Выработка M (в технической единице массы) за единицу времени выражается формулой

$$M = \iint_{\Omega} \gamma(x, y) w(x, y) dx dy = \iint_{\Omega} \gamma(x, y) w^0(x, y) dx dy + \Delta P \iint_{\Omega} \gamma(x, y) w^0(x, y) dx dy. \quad (82)$$

Отсюда

$$\Delta P = \frac{M - \iint_{\Omega} \gamma(x, y) w^0 dx dy}{\iint_{\Omega} \gamma(x, y) w^0 dx dy}. \quad (83)$$

Вычислив интеграл $\iint_{\Omega} \gamma w dx dy$ по той части сечения, где $w(x, y) > 0$, найдем расход потока в прямом направлении; по той части сечения, где $w(x, y) < 0$, найдем расход потока в обратном направлении.

Итак, решение задачи распадается на следующие этапы: вычисление коэффициентов $\mu(x, y)$ и величин $F(x, y)$; решение уравнений (79) и (80), вычисление интегралов $\iint_{\Omega} \gamma w dx dy$ и $\iint_{\Omega} \gamma w^0 dx dy$, вычисление ΔP и уравнение $w(x, y) = w^0(x, y) + \Delta P w^0(x, y)$, а также расходов прямого и обратного потоков стекломассы.

Уравнения (79) и (80) решают методом конечных разностей. Высоту бассейна H и ширину B делят на M слоев по горизонтали и на N слоев по вертикали.

Рассмотрим уравнение (79) в области $0 < x < H$: $-\frac{B}{2} < y < \frac{B}{2}$ граничные условия

$$w|_{x=H} = 0; w \Big|_{y=-\frac{B}{2}} = 0, w \Big|_{y=\frac{B}{2}} = 0, (1-\alpha) w \Big|_{x=0} - \frac{dw}{dx} \Big|_{x=0} = 0, \quad (84)$$

где $\alpha = 0$ в случае протока и $\alpha = 1$ в случае свободной верхней поверхности

Для решения уравнений использован метод прогонки [2, 17]. Прогоночные коэффициенты учитывают изменения вязкости и скорости движения стекломассы. Интегралы $\iint_{\Omega} \gamma w dx dy$ и $\iint_{\Omega} \gamma w^0 dx dy$ вычисляются по формуле Симсона приближенного интегрирования, проводя дальнейшие расчеты по формуле

$$\iint_{\Omega} w(x, y) dx dy = \frac{B}{2} \left(\sum_{n=1}^{N-1} \left(\int_0^H \gamma(x, y) w(x, y) dx \right) dy \right). \quad (85)$$

После того как начислены интегралы, можно определить ΔP , используя формулу (83). Теперь можно вычислить интенсивности прямого и обратного потоков

$$w_{m,n} = w_{m,n}^1 + \Delta P w_{m,n}^0 \quad (86)$$

§ 26. АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Для поддержания установленных параметров теплового режима, обеспечивающих достижение высоких показателей по производительности, повышению качества выпускаемых изделий и экономному расходованию топлива, каждая стекловаренная печь оснащается автоматизированной системой управления процессами плавки стекла с использованием электронно-вычислительных машин (ЭВМ).

Автоматизированная система управления процессом плавки стекла включает:

стабилизацию теплового режима во всех зонах печи посредством стабилизации температуры изменением расхода газа;

поиск и поддержание оптимального соотношения газ / воздух по зонам изменением расхода газа и воздуха;

стабилизацию давления в варочной и выработочной частях печи изменением разрежения в дымовых каналах;

стабилизацию уровня стекломассы изменением количества загружаемых шихт;

управление переводом направления пламени (для регенераторных печей) и выравнивание температурного перекоса регенераторов изменением времени перевода направления пламени.

С помощью ЭВМ осуществляется выдача информации о параметрах печи: температуры и давления в пламенном пространстве, температурах стекломассы, температуры регенераторов (верхних и низ), расхода газа и воздуха, а также давления газа и разрежения в дымовом канале за печью, уровня стекломассы, содержания кислорода в отходящих газах из горелок и другие данные.

Выходящая информация от ЭВМ представляется на дисплее в виде периодически обновляемой таблицы, а также в форме ежечного и дневного докладов.

Для наблюдения за процессом горения топлива (факела) используется промышленное телевидение.

В автоматизированной системе используются электронно-вычислительные машины типа «Электроника-1001» и др.

Контроль режимов печи осуществляется с использованием контрольно-измерительной аппаратуры. Такая аппаратура предназначена для измерения температуры (термопары, оптические пиromетры), давления газа (манометры), состава льямовых газов (ручным и автоматическим газоанализаторами), расхода газа и воздуха (расходомерами), уровня стекломассы (уровнемерами) других параметров.

Автоматическое регулирование температурного режима в варочной и выработочной частях осуществляется по зонам с помощью релейного регулятора путем изменения расхода топлива в соответствующей зоне. Обычно варочная часть печи подразделяется на три зоны, выработочная часть имеет одну зону. Каждая зона имеет самостоятельную систему регулирования температуры. Датчиками температуры являются термопары платинородий-платинородиевые,

расположенные в своде и дне печи. Для измерения температуры в секциях регенераторов устанавливают термопары, вверху — платинородий-платинородиевые, внизу — хромель-алюминевые. Они подключаются к многочтоточным электронным потенциометрам.

Стабилизация соотношения газ — воздух, обеспечивающая экономичность горения топлива, осуществляется локальными системами автоматики по зонам, отдельно по левой и правой сторонам печи. В качестве регуляторов используются электронные регуляторы, датчиками являются дифманометры — расходомеры ДМЭР, ДСЭР, которые контролируют расход газа и воздуха по зонам. Давление в пластинах пространстве варочной и выработкой частей печи регулируется также электронным регулятором, который в зависимости от направления пластины воздействует на один из исполнительных механизмов, соединенных с поворотными шайбами, установленными в дымоходящих каналах с обеих сторон печи. Первичным прибором является дифманометр.

Разрежение перед шибером дымовой трубы измеряется дифманометром в комплекте с вторичным прибором. Расход газа и воздуха измеряются дифманометрами и вторичными приборами.

Непрерывный контроль за содержанием кислорода в отходящих газах производится с помощью газоанализатора (типа МИ-1506).

Показания температур во всех точках, расход газа и воздуха по горелкам, давление газа, разрежение и другие параметры вводятся в ЭВМ, а также регистрируются вторичными приборами, установленными на цепях автоматизации.

Автоматическое переключение переводных клапанов регенеративных стекловаренных печей осуществляют по времени или по значению температуры верха или низа регенераторов. В промышленности переключение переводных клапанов принято через 25–30 мин.

Перевод направления пластины осуществляется в такой последовательности: звуковой сигнал о начале перевода, закрытие газового клапана с одной стороны и отключение подачи воздуха, перевод шиберов, включение подачи воздуха, открытие газового клапана с противоположной стороны. В случае незавершения перевода пластины за определенный отрезок времени (40 с) подается звуковой и световой сигнал.

Автоматическое регулирование уровня стекломассы в печи обеспечивается уровнемером (электроконтактным, пневматическим, оптическим и др.), включающим датчики вторичного измерительного прибора. При достижении стекломассой уровня ниже установленного подается команда на загрузочное устройство, которое регулирует скорость подачи шихты или ее отключение.

Размещение технических средств автоматической системы управления процессом варки стекла предусматривается в непосредственной близости к стекловаренным печам в отдельных помещениях.

Первичные приборы и датчики, а также камеры промышленной гелий-ионной установки располагаются по месту в зоне печи; шиты с приборами, ЭВМ, дисплеи — в помещении пункта АСУТП.

ГЛАВА IX. ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

§ 27. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ ЦЕМЕНТНОЙ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

Обжиг тонкоизмельченной и гомогенизированной сырьевой смеси требуемого химического состава — важнейшая составная часть технологического процесса при производстве цементов различных видов.

В результате обжига сырьевой смеси получают цементный клинкер, являющийся промежуточным продуктом для производства цемента. В готовом продукте обжига — клинкере содержатся в основном известняк (CaO) и кремнезем (SiO_2), а также в меньшем количестве глинозем (Al_2O_3) и окись железа (Fe_2O_3).

Указанные компоненты находятся в клинкере в химически связанным состоянии в виде сплитиков, алюминатов и алюмоферритов.

Свойства портландцемента как вяжущего материала характеризуются прежде всего свойствами составляющих его искусственных минералов, основными из которых являются: трехкальциевый силикат ($3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), двукальциевый силикат ($2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), алюмоферрит кальция переменного состава от $8 \text{CaO} \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ до $2 \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и алюминаты кальция состава $2 \text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ до $5 \text{CaO} \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3$.

Кроме того, в клинкере могут быть и другие минералы, образованные химическими примесями в исходном сырье.

Количественное содержание указанных минералов в клинкере зависит от химического состава исходной сырьевой смеси, от режима обжига и охлаждения клинкера.

Образование клинкера предшествует ряд промежуточных физико-химических процессов, которые протекают в определенных температурных интервалах, так называемых технологических зонах печного агрегата.

В основном это процессы химического и физического распада кристаллических решеток минералов, составляющих сырьевые компоненты; рекристаллизацияmonoфаз и образование твердых растворов на низкотемпературной стадии обжига; растворение в расплаве перекристаллизовывающихся фаз и кристаллизация из расплава на высокотемпературной стадии обжига. При охлаждении клинкера наблюдается распад твердых растворов.

При мокром способе производства шлам с влажностью в среднем 37–39% поступает в зону сушки вращающейся печи. В процессе постепенного нагревания шлама испаряется содержащаяся в нем влага, в результате чего изменяются реологические свойства шлама. В этом случае шлам достигает такой вязкости, при которой в цепи

завесе начинают образовываться гранулы, которые покидают цепную завесу с влажностью 6—12% и температурой около 90—100° С.

Расход тепла на испарение влаги шлама зависит главным образом от начальной влажности и может достигать 2620 кДж/кг клинкера, что составляет при мокром способе производства более одной трети удельного расхода тепла на обжиг клинкера.

Поступающий в цепную завесу газовый поток имеет температуру 800—1000° С, а по выходе из нее — около 150—250° С.

В следующей технологической зоне — подогрева и легиратации — материал досушивается и нагревается до 600° С. При температуре материала 450° С начинается процесс дегидратации, и далее по мере повышения температуры каолинитовое ядро глинистого компонента распадается на SiO_2 и Al_2O_3 . В конце этой технологической зоны наблюдается также декарбонизация углекислого магния.

Участок печи, где происходит разложение карбоната кальция, называется зоной декарбонизации. Эта зона с теплотехнической точки зрения является глинной зоной печи, где наблюдается максимальное потребление тепла.

Процесс декарбонизации начинается при температуре материала около 600° С и ускоряется по мере повышения температуры, достигая максимума при 900° С, когда парциальное давление CO_2 достигает 7600 Па. На кинетику процесса декарбонизации во вращающихся печах могут оказывать влияние химические особенности сырья, концентрация CO_2 и H_2O в топочных газах, которая, в свою очередь, зависит от вида применяемого тоцлива. Образующаяся в результате декарбонизации CaO в силу повышенной химической активности может испустить в реакцию с кислотными окислами в твердом состоянии еще до полного завершения декарбонизации.

Однако скорость твердофазовых взаимодействий становится заметной при температуре выше 800° С. При дальнейшем нагревании материала образуются силикаты, алюминаты и ферриты кальция, реакции которых являются экзотермическими. В результате выделения тепла материала быстро нагревается до 1280° С и образуется жидкая фаза, составляющая 20—30% массы клинкера. На образование жидкой фазы затрачивается тепло — около 210 кДж/кг клинкера.

Появление жидкой фазы вызывает существенное ускорение процесса клинкерообразования. К этому времени образуются 3 $\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$, 4 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и 2 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. При температуре 1400—1450° С 2 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ насыщается CaO до 3 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, и процесс клинкерообразования на этой стадии считается завершенным.

Следует, однако, иметь в виду, что режим охлаждения клинкера может влиять на соотношение фаз против расчетного состава и микроструктуру клинкера и, следовательно, на качество клинкера.

§ 28. ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПЕЧИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

Цементный клинкер обжигают в печных агрегатах. Наиболее распространены печные агрегаты с вращающимися печами. Широкое применение таких агрегатов обусловлено их высокой единичной производительностью, возможностью использовать различные виды технологического топлива, а также простотой обслуживания и надежностью эксплуатации. Печной агрегат состоит из вращающейся печи, холодильника, устройства для скижания тоцлива, тягодутьевых устройств и средств пылеочистки отходящих печных газов.

В настоящее время существует два способа получения клинкера: мокрый и сухой.

Мокрый способ предполагает приготовление сырьевой смеси в виде сметанообразной суспензии (шлама) путем тонкого измельчения исходных сырьевых материалов с водой. Влажность сырьевого шлама, выражаясь обычно в относительных процентах, зависит от физических свойств исходных материалов и находится, как правило, в пределах 32—50%.

При указанных пределах относительной влажности сырьевых шламов обычно достигается приемлемая вязкость (растекаемость) для последующей транспортировки по трубопроводам.

При сухом способе сырьевые материалы предварительно высушивают, и весь дальнейший процесс приготовления сырьевой муки производят в сухом состоянии.

Выбор способа получения цементного клинкера определяется многими факторами, но главными из них являются естественная влажность сырьевых компонентов и стоимость тоцлива. Несомненными достоинствами сухого способа являются существенно меньший удельный расход тоцлива на обжиг, а также меньшие габариты обжигового агрегата, чем при мокром способе. Однако если естественная влажность сырьевой смеси превышает 15—18%, то по удельному расходу теплоты на обжиг сухой способ производства перед мокрым не будет иметь преимуществ.

ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПЕЧИ МОКРОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА КЛИНКЕРА

Вращающиеся печи состоят из следующих элементов: цилиндрического корпуса с бандажами и внешней шестерней, привод вращения, роликопод, встроенные или вращающиеся теплообменники, холодной и горячей головкой с уплотнительными устройствами. Корпус печи сваривается из металлических обечайек. На нем закрепляют по прокладкам массивные концы прямоугольного сечения, которые называются бандажами. Участки корпуса печи, где устанавливают бандажи обечайки, изготавливают из более толстого листа, чем все остальные. Обычно бандажи изготавливают литыми для печей диаметром менее 4 м, а для печей больших диаметров — сварными

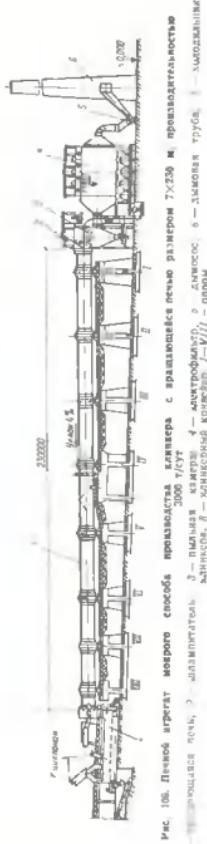


Рис. 106. Печной агрегат мокрого способа производства с вращающейся печью размером 7×230 м: производительность — 3000 т/ч; длина корпуса печи — 230 м; диаметр печи — 7 м; производительность — 3000 т/ч; высота печи — 10,2 м; высота конуса — 1,5 м; высота конца конуса — 0,7 м; диаметр трубы — 1,02 м; высота конца трубы — 1,02 м.

из двух половин. Для печей мокрого способа производства венцовую шестерню устанавливают примерно на середине, а для сухого способа — ближе к «холодному» концу печи.

Венцовая шестерня находится в зацеплении с подвенцовой шестерней. Печь приводится во вращение электродвигателем через понижающий частоту вращения шестеренчатый редуктор.

Кроме основного рабочего двигателя привода имеется вспомогательный, который обеспечивает вращение печи в случае внезапного выхода из строя основного привода. Бандажи сминаются на роликовые опоры, смонтированные на металлической раме, которую устанавливают на массивном железобетонном фундаменте. В месте соединения корпуса вращающейся печи с пыльной камерой, а также с горячей головкой устанавливают уплотнительные устройства, препятствующие подсосу наружного воздуха в печное пространство.

На рис. 106 показан общий вид печного агрегата с вращающейся печью размером 7×230 м. Вращающаяся печь оснащена внутривальными теплообменными устройствами и предназначена для производства цементного клинкера по мокрому способу производства. Она состоит из цилиндрического сварного корпуса, установленного на роликоопорах, двухстороннего привода, загрузочной и разгрузочной частей, газовых форсунок с механизмами перемещения, устройством для возврата пыли, установленной в электрофильтрах, и уплотнений концов печи. Внутри корпуса смонтированы теплообменные устройства, а собственно корпус защищен футеровкой из огнеупорного кирпича.

Исходное сырье в виде жидкотекущего шлама подается в печь

по наклонной течке. Обожженная в печи сырьевая смесь в виде клинкера поступает в колосниковый холодильник для охлаждения. Печь оснащена контрольно-измерительной аппаратурой, а также системой автоматического контроля и регулирования технологического процесса обжига клинкера. Опорные ролики выполнены на подшипниках качения, что существенно сократило расход мощности на привод. Поскольку печь имеет угол по отношению к горизонту, то для удержания ее в определенном положении на роликоопорах смонтирована система гидравлических упоров. Смазка упорных подшипников и опорных роликов, подшипников и шестерен редукторов главного привода и подвенцовых шестерен — жидккая, инжекционная, централизованная.

Техническая характеристика агрегата с вращающейся печью

| | |
|--|------------------------------|
| Внутренний диаметр корпуса печи, м | 7 |
| Длина корпуса печи, м | 230 |
| Высота печи, % | 4 |
| Производительность печи по клинкеру, т/сут | 3000 |
| Число опор | 8 |
| Частота вращения корпуса печи от главного привода, мин ⁻¹ | 0,47—0,93 |
| Регулировка частоты вращения | электрическая бесступенчатая |
| Частота вращения корпуса печи от вспомогательного привода, ч ⁻¹ | 3,6 |
| Мощность электродвигателей главного привода, кВт | 2×630—1250 |

Теплообменные устройства. В зоне сушки шлама во вращающихся печах поверхность передачи тепла от газового потока к шламу относительно невелика.

Для развития поверхности теплопередачи и интенсификации процесса подогрева и сушки шлама извенициают цепные завесы. При вращении печи цепи периодически омываются шламом и газовым потоком. Находясь в газовом потоке, цепи экзокалируют теплоту, а затем часть ее отдают шламу. Цепи также улучшают контакт газового потока со шламом, который интенсифицирует процесс испарения влаги шлама. Во время сушки шлам изменяет свои реологические свойства и из жидкотекущего становится вязким и затем сипучим.

В связи с широким диапазоном изменения свойств шлама по длине зоны сушки изменяется и теплотехнический режим работы цепей. В зоне жидкотекущего шлама на цепях создается сравнительно тонкая, непрерывно обновляющаяся пленка шлама. В этом режиме цепи работают частично по регенераторному циклу, т. е. получают теплоту от газового потока и отдают ее при погружении в шлам. В той же части зоны сушки, где на цепях образуется устойчивая пленка, роль их как теплопередающей поверхности в регенерации теплоты уменьшается и тем больше, чем толще становится пленка

шлама на них. В этих условиях цепи увеличивают поверхность непосредственного контакта шлама с газовым потоком.

Естественно, что в то время, когда цепи работают в регенеративном цикле, средняя температура их будет выше, чем высушиваемого шлама, но ниже, чем газового потока. Во втором периоде температура цепей должна быть примерно равна температуре шлама в рассматриваемом сечении печи.

Когда шлам теряет пластические свойства и становится сыпучим (обычно это происходит при остаточной влаге в шламе 8—12%), цепи не обволакиваются шламом и работают в чисто регенеративном цикле: по выходе из шлама они нагреваются теплотой газового потока и при попадании в шлам отдают часть этой теплоты. Однако при этом следует иметь в виду два обстоятельства: во-первых, интенсивность теплообмена между цепями и «сухим» шламом в несколько раз ниже интенсивности теплообмена с жидким шламом; во-вторых, температура газов в этом сечении печи также становится более высокой. Поэтому средняя температура цепей на этом участке будет наиболее высокая, она приближается к температуре газового потока.

На цементных заводах применяются цепные завесы двух основных видов: свободно висящие и гирляндные.

Свободно висящая навеска цепей (рис. 107) используется на различных вращающихся печах, но преимущественно для шламов с высокой начальной влажностью. Такая навеска отличается простотой конструкции и малочувствительностью к изменению реологических свойств шлама в процессе сушки. Эффективность ее как теплообменного устройства возрастает по мере увеличения плотности навески. Исходя из этого свободно висящая навеска является высокое гидравлическое сопротивление, что приводит к перерасходу электроэнергии за счет установки дымососов повышенной мощности.

Существует несколько наиболее распространенных способов навески свободно висящих цепных завес: в шахматном порядке на кольцах, установленных на равных расстояниях один от другого; на продольных полках, несколько смешанных по отношению к оси печи и так называемая коридорная система. Навеска цепей на полках, смешанных по отношению к оси печи, наиболее рациональна, так как способствует продвижению вязкого шлама вдоль печи.

Гирляндные цепные завесы могут быть двух видов. Первый предусматривает навеску цепей на кольцах, прикрепленных к кориусу печи на равном расстоянии один от другого, второй — навеску в виде трехзаходного винта. Раньше применялась навеска цепей на продольных швеллерах, прикрепленных к корпусу печи. Гирлянда цепи закреплялась на двух кольцах с соответствующим угловым смещением. Угол смещения гирлянды является важной характеристикой цепной завесы и составляет обычно около 120°.

В этом случае цепная завеса имеет два участка. На первом участке (по ходу шлама) длина цепей больше, поэтому они сильнее проникают, на втором участке цепи короче и провисают соответственно меньше.



Рис. 107. Свободно висящая цепная завеса



Рис. 108. Гирляндовая цепная завеса с повышенной транспортирующей способностью

Этот прием позволяет создать лучшие условия для обесцвечивания газового потока на участке цепей, где они непрерывно смачиваются шламом, на этом же участке с той же целью плотность навески цепей обычно выбирается несколько большей.

На одной трети длины цепной завесы (второй участок) гирлянды делаются несколько короче. Укороченные гирлянды меньше провисают, что способствует сохранности полученных ранее гранул шлама.

По данным испытаний врачающейся печи после навески гирляндой цепной завесы содержание гранул размером 3—7 мм после цепной завесы увеличилось до 60—70%. Равномерность гранулометрического состава резко снизила содержание пыли в материале и в газовом потоке, сократив пылевыброс из печи. Гранулометрический состав материала по выходе из гирляндой цепной завесы приведен ниже.

| Размер гранул, мм | Больше 10 | 10—7 | 7—3 | 5—3 | 3—2 | 2—1 | 1—0,5 | 0,5—0,25 | Меньше 0,25 |
|-----------------------|-----------|------|-------|------|-------|------|-------|----------|-------------|
| Содержание фракций, % | 6,96 | 13,5 | 22,55 | 34,6 | 13,22 | 7,88 | 0,98 | 0,31 | 0,28 |

В цепных завесах этого типа гранулы формируются в основном за счет дробления слоя вязкого и пластичного шлама при погружении в него цепей. Увеличение интенсивности сушки шлама приводит к уменьшению размера гранул.

Следует отметить, что описанная конструкция гирляндных цепных завес может успешно применяться только при шламах с хорошей текучестью в процессе сушки. В противном случае замызаются цепи и шлам переливается в пыльную камеру.

В случаях когда шлам обладает высокими пластичными свойствами, необходимо применять цепные гирляндные завесы с повышенной транспортирующей способностью (рис. 108).

При проектировании цепных завес необходимо учитывать, что интенсивность теплообмена в «холодной» и в «горячей» части цепной завесы различна. В связи с этим в ПИИицемента была разработана методика расчета гирляндных цепных завес с учетом изменения характера теплообмена в них [26].

Для «холодной» части цепной завесы, где преобладает конвективный теплообмен, коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле

$$Nu = 0,1 Re^{0.5} \quad (87)$$

В «горячей» части цепной завесы, как уже упоминалось, цепи работают в регенеративном цикле и коэффициент теплоотдачи подсчитывают по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{реч}} = \frac{1}{\frac{2\pi}{\alpha_r(2\pi - \varphi)} + \frac{2\pi}{\alpha_m \varphi}} \quad (88)$$

где α_r — коэффициент теплоотдачи от газа к цепям; α_m — коэффициент теплоотдачи от цепей к материалу; φ — центральный угол сегмента материала.

Коэффициент теплоотдачи от газа к цепям определяют по формуле

$$Nu = 0.45 Re^{0.5} \quad (89)$$

В большинстве случаев, как показали эксперименты, значение α_m в технических расчетах можно принимать равным 800 кВт / (м² · К).

Для определения коэффициента теплоотдачи непосредственно от газового потока к открытой поверхности откоса материала можно пользоваться формулой

$$Nu = 0.347 Re^{0.68} \quad (90)$$

К характеристикам цепных завес следует отнести также плотность наивески цепей,ющее значение которой определяют исходя из условия достаточной транспортирующей способности. Для цепей с повышенной транспортирующей способностью конструкции ПИИицемента это условие отпадает. При этом максимальную плотность наивески цепей определяют так, чтобы цепи не защемлялись. Кроме того, необходимо соблюдать порядок прохождения одиночных точек гирлянды данного ряда относительно точек двух гирлянд соседнего ряда.

Эти условия необходимо соблюдать, чтобы цепи не перегружались в некоторых положениях массой соседних цепей. Длину гирлянды нужно выбирать таким образом, чтобы в любом ее положении звенья цепи не касались футеровки, так как в противном случае они будут разрушать транзит материала. В той части трансформирующей печи, где шлам становится сухим и заполнение им поперечного сечения печи находится в пределах 7–15%, наблюдается снижение интенсивности нагревания материала. С целью интенсификации теплообмена на этом участке печи устанавливают различного рода теплообменные устройства, которые позволяют существенно увеличить поверхность соприкосновения материала с газовым потоком.

В промышленности используют теплообменники, которые отличаются как по конструкции, так и по способу передачи теплоты. Среди них можно выделить ячейковые металлические и керамические; звеньевые и гирляндные; теплообменники в виде пересыпающих поластей; циклонные; экранирующие.

Ячейковые металлические и керамические теплообменники. В ячейковых теплообменниках печь разделена на ячейки, по которым вдоль полок теплообменника проходит расщеленный поток обжигаемого материала. В результате значительно увеличивается внутренняя поверхность теплообмена в печи и интенсифицируется передача тепла за счет регенеративного цикла. Полки теплообменников получают теплоту от газового потока, а потом передают аккумулированную теплоту материала путем теплопроводности и излучения. Количество теплоты, переданной материалу, будет зависеть от поверхностно-теплообменников, их массы и теплофизических свойств материала.

Расклепание обжигаемого материала на несколько потоков уменьшает термическое сопротивление слоя и улучшает перемешивание материала в слое.

По характеру транспортирования и перемешивания материала между металлическими и керамическими теплообменниками принципиальной разницы нет. Существенным отличием керамических теплообменников от металлических является повышенное гидравлическое сопротивление первых вследствие значительного сужения поперечного сечения печи.

Длину установки ячейковых металлических теплообменников можно определить по формуле, предложенной в [33]:

$$L_t = 6\alpha_r \alpha_m F_T M_T \quad (91)$$

где L_t — длина участка печи, занятой теплообменниками, м; G — производительность печи, кг / ч; $F_T = \pi D (1 - K_T)$ — условная поверхность теплообменников, приходящаяся на 1 м длины печи; D — внутренний диаметр печи, м; $K_T = \frac{f_T}{\pi D^2}$ — отношение поверхности теплообменников к внутренней поверхности футеровки на 1 м длины печи; $\alpha_r = 14.9 \cdot 10^{-6}$ — коэффициент теплоотдачи, Вт / (м² · К); α_m — скорость газового потока, м / с; M_T — среднеграфическая разница температур между газовым потоком и материалом; $M_T = \Delta T_{\text{изд}}$ — величина, характеризующая материалом в заданных температурном интервале.

Среднелогарифмическая разность температур

$$\Delta t_T = \frac{(t'_c - t'_m) - (t''_c - t''_m)}{2,3 \lg \frac{t'_c - t'_m}{t''_c - t''_m}} \quad (92)$$

где t'_c — температура газового потока на выходе из теплообменников, °С; t''_c — температура газового потока на входе в теплообменники; t'_m , t''_m — температура материала на входе в теплообменники, °С; t''_m — температура материала на выходе из теплообменников, °С.

Обычно температуру газового потока на входе в теплообменник принимают не выше 1000 °С. Температура поступающего в теплообменники материала составляет около 100 °С.

Количество теплоты, передаваемой материалу в зоне теплообменников, подсчитывают по формуле

$$q_t = V' c'_t t'_c - q_{\text{п.}} \quad (93)$$

где $V' c'_t t'_c$ — энтальпия газового потока на входе в теплообменники, кДж/кг; $V' c'_t t'_c - V'' c''_t t''_c$ — энтальпия газового потока на выходе из теплообменников, кДж/кг; $q_{\text{п.}}$ — потеря теплоты корпуса печи на участке установки теплообменников, кДж/кг клинкера; $V_t = V_1$ — количество газов на входе в теплообменник и выходе из него, м³; c' , c'' — теплопемкости газа при t'_c и t''_c .

Следует иметь в виду, что t'_c не следует принимать ниже 700 °С из-за условий достаточной эффективности работы цепной зоны.

Металлические теплообменники всех типов устанавливаются в той части вращающейся печи, где температура газового потока не превышает 1000 °С, исходя из условия их достаточной термической и механической стойкости.

Конструктивный недостаток таких теплообменников — их значительная масса, которая приводит в некоторых случаях к разрушению корпуса печи, а технологический недостаток — несколько повышенное вылезание из зон теплообменников из-за перегрева. Это ограничивает широкое распространение ячеековых теплообменников в промышленности.

На рис. 109, 110 показаны схемы конструкции ячеековых металлических и керамического теплообменников. С целью минимального гидравлического сопротивления керамические теплообменники обычно выполняют в виде трех ячеек.

Звеньевые и гирляндные теплообменники представляют собой набор массивных звеньев, соединенных между собой с помощью шарниров. Для этих теплообменников характерно крепление ячеек теплообменника к корпусу печи. Теплообменники предусматривают полное условное перекрытие сечения печи путем сдвига точек крепления каждого последующего ряда ветвей на 15° по окружности.

Принцип работы таких теплообменников чисто регенеративный: теплота накапливается звенями во время нахождения в газовом



Рис. 109. Ячеековые (а, б, в) металлические теплообменники

потоке и отдается материалу при погружении звеньев теплообменника в слой. В тепловом отношении более эффективной следует признать гирляндную конструкцию, так как здесь можно больше использовать наклонную теплоту из-за полного погружения ветви теплообменника в материал.

В зоньевом теплообменнике в регенеративном цикле передачи теплоты участвуют только отдельные звенья без его центральной части. Пылеобразование более значительным у гирляндных теплообменников за счет разрушения тяжелыми элементами теплообменника групп материала.

Такие теплообменники являются хорошим экраном для цепей и предохраняют их от преждевременного выгорания. Изготавливают эти теплообменники из наиболее жаростойких сталей, и их можно применять в более горячих зонах печи, нежели металлические ячеековые теплообменники.

Число рядов и длину участка печи, где устанавливают теплообменники, подбирают опытным путем.

Теплообменники в виде пересыпающих лопастей по устройству наиболее просты и представляют собой ряд лопастей из металла или керамики. К ним можно отнести также различные типы рифленых фтлеровок. В гидравлическом отношении пересыпающие лопасти могут обеспечить максимум интенсивности нагревания сырья при взвешивании в газовом потоке значительной массы материала.

Интенсивное перемешивание вызывает одновременно разрушение гранул материала, вымучивает содержащуюся в потоке материала влагу, которая уносится газами, а величина пылеусос из вращающейся печи. Этот существенный недостаток пересыпающих теплообменников ограничивает их распространение.

При правильном сочетании теплообменников с пересыпающими лопастями с эффективной плотной цепной завесой они могут найти более широкое применение во вращающихся печах.

Экранирующие теплообменники представляют собой грибовидные металлические (чугунные или стальные) башмаки, устанавливаемые непосредственно над керамической футеровкой. Такие теплообменники применяют лишь в некоторых случаях. Такая установка увеличивает поверхность теплоотдачи и изменяет теплопроводность поверхности стоя футеровки, который непосредственно участвует в регенеративном цикле передачи тепла.

Как уже упоминалось, большое значение для регенеративной передачи теплоты имеет теплопроводность теплопередающей поверхности материала и, в частности, так называемый коэффициент теплосвоения, определяемый по формуле

$$\alpha' = \frac{1}{\lambda} \cdot \sqrt{17.5t}, \quad (9)$$

где α' — теплопроводность, кДж/К; λ — теплопроводность, кВт/(м·К); плотность, кг/м³; t — частота вращения печи, мин⁻¹.

Исходя из значений величин, входящих в формулу (9) для шамотного кирпича и экранирующих теплообменников, изготовленных из чугуна, приведенных в табл. 15, видно, что установка теплообменников позволяет примерно на 20—25% увеличить количество переданной теплоты.

Таблица 15. Техофизические свойства экранирующих теплообменников

| Материал | Техофизические свойства | | |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------|
| | λ , Вт/(м·К) | α' , кВт/(м·К) | ψ , кг/м ³ |
| Шамотный кирпич | 1.05 | 1.05 | 1800 |
| Чугунные экранирующие башмаки | 45 | 0.7 | 7900 |

Однако экранирующие теплообменники имеют недостатки, из которых главным следует считать замыкание их поверхности шлам-

ом, из-за чего резко сокращается тепловая эффективность теплообменников.

Конструкция циклонного теплообменника разработана в НИИцементе. Он в значительной мере устраивает недостатки зерниевых теплообменников.

Конструктивно такой теплообменник представляет собой набор трапециевидных лопастей, отвалцованных по определенному радиусу, который облегчает скольжение слоя обжигаемого материала по внешней поверхности элементов теплообменника без отрыва, что обеспечивает минимальное пылеобразование в зоне установки теплообменников. Элементы теплообменника устанавливают в печи выпуклой стороной в направлении геометрической оси в коридорном порядке по шести рядов в попечном сечении. Угол наклона оснований элементов теплообменника к образующей корпуса печи составляет 15—23°.

Эксплуатация циклонного теплообменника показала его высокую надежность в работе, простоту монтажа и главное стабильность теплового и технологического режимов работы вращающихся печей.

Установка циклонных теплообменников во вращающихся печах увеличивает их производительность на 5% и обеспечивает снижение удельного расхода топлива на обжиг до 7% при общем уменьшении пыле выброса из рабочего пространства. Общий вид установки циклонного теплообменника во вращающейся печи показан на рис. 111.

УСТАНОВКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ С МЕХАНИЧЕСКИМ ОБЕЗВОЖИВАНИЕМ ШЛАМА

Использование во вращающихся печах чокрого способа производства клинкера встроенных теплообменников устройств позволяет несколько сократить удельный расход топлива на обжиг клинкера. Однако решить проблему существенной экономии топлива в результате использования теплообменников принципиально невозможно.

Одним из путей решения проблемы экономичного обжига по мокрому способу производства является претварительное механическое обезвоживание шлама преимущественно путем использования фильтр-прессов. В практике производства цемента в зарубежных, индустриально развитых странах имеется опыт реконструированных печных установок с использованием гидробокового обезвоживания



Рис. 111. Циклонный теплообменник.

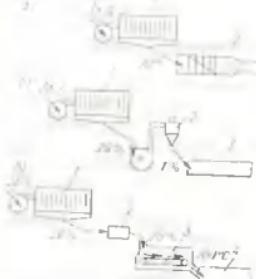


Рис. 112. Схемы вращающихся печей с промежуточной фильтрацией шлама в печах для полумокрого способа: а — схема для полумокрого способа; б — схема для сухого способа с сушинкой-дробилкой; 1 — пресс фильтр; 2 — печь с короткой цепной завесой; 3 — сушинка-дробилка; 4 — печь для сухого способа с подготовкой сырья; 5 — пресс фильтр; 6 — грохот; 7 — колосниковая решетка-подогреватель; 8 — короткая врачающаяся печь

ности 18%. Затраты электроэнергии на обезвоживание составят 18 кВт · ч т, или 65 кДж/кг клинкера, что в сумме составит 4665 кДж/кг клинкера и позволит экономить примерно 1600 кДж/кг клинкера, или 25% топлива по отношению к печам мокрого способа производства с удельным расходом теплоты 6300 кДж/кг клинкера. На рис. 112, б показана другая технологическая схема с более экономным расходом теплоты, но требующая более высоких капитальных вложений. В схему дополнительно включена дробилка-сушка, и печь питается практически сухим шламом. В этом случае можно получить 30—35% экономии топлива.

В схеме с более глубоким теплонапытыванием (рис. 112, б) предусмотрена грануляция фильтрованного продукта и последующий подогрев его на колосниковой решетке за счет теплоты отходящих газов вращающейся печи. В этом случае можно получить экономию топлива до 40—45%. Известны и другие схемы с использованием фильтр-прессов, в которых предполагается измельчать высущенный фильтрованный продукт с последующим обжигом его в печах с циклонными теплообменниками.

ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПЕЧИ СУХОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА

Конструктивно вращающиеся печи сухого способа производства отличаются незначительно от вращающихся печей мокрого способа производства. Отношение длины к диаметру для печей сухого спо-

шлама до 18—19% остаточной влажности на автоматизированных фильтр-прессах. Производительность указанных фильтр-прессов позволяет выпускать один агрегатом 50—60 т ч клинкера.

В настоящее время практически реализованы пять различных технологических схем с использованием фильтр-прессов, с помощью которых достигнуто удельный расход теплоты 3500—4600 кДж/кг клинкера.

На рис. 112, а представлена технологическая схема с обезвоживанием шлама и последующим обжигом фильтрованного продукта во вращающейся печи с короткой цепной завесой. Как показывают расчеты, по этой схеме можно достичнуть удельного расхода теплоты на обжиге примерно 4600 кДж/кг клинкера при условии остаточной влажности 18%. Затраты электроэнергии на обезвоживание составят 18 кВт · ч т, или 65 кДж/кг клинкера, что в сумме составит 4665 кДж/кг клинкера и позволит экономить примерно 1600 кДж/кг клинкера, или 25% топлива по отношению к печам мокрого способа производства с удельным расходом теплоты 6300 кДж/кг клинкера.

На рис. 112, б показана другая технологическая схема с более экономным расходом теплоты, но требующая более высоких капитальных вложений. В схему дополнительно включена дробилка-сушка, и печь питается практически сухим шламом. В этом случае можно получить 30—35% экономии топлива.

В схеме с более глубоким теплонапытыванием (рис. 112, б) предусмотрена грануляция фильтрованного продукта и последующий подогрев его на колосниковой решетке за счет теплоты отходящих газов вращающейся печи. В этом случае можно получить экономию топлива до 40—45%. Известны и другие схемы с использованием фильтр-прессов, в которых предполагается измельчать высущенный фильтрованный продукт с последующим обжигом его в печах с циклонными теплообменниками.

соба составляет 12—20, т. е. значительно меньше, чем для печей мокрого способа производства.

Вращающаяся пещь ставится ближе «холодному» концу пещи. В связи с тем что вращающиеся печи сухого способапитаются сухим шламом, температура отходящих газов из таких печей имеет более высокие значения, чем температура отходящих газов из печей мокрого способа. Поэтому современные вращающиеся печи сухого способа производства эксплуатируются только с запечными теплообменниками, которые позволяют эффективно утилизировать теплоту отходящих газов. В результате этого печные агрегаты сухого способа обеспечивают низкий удельный расход теплоты на обжиг клинкера. Для лучших современных печных агрегатов удельный расход теплоты составляет 3100 кДж/кг клинкера, т. е. вдвое меньше, чем удельный расход теплоты печей мокрого способа производства. На рис. 113 показан отечественный печной агрегат. Он состоит из вращающейся печи, запечных циклонных теплообменников, колосникового холодильника, передвигающего тяга, тяги пневматического и обессыпывающего оборудования. Корпус вращающейся печи представляет собой сварной полый цилиндр внутренним диаметром 6,4 м и длиной 95 м, футерованный изнутри огнеупорным кирличом. В загрузочной части диаметр корпуса печи увеличен и составляет 7 м. Печь установлена на четырех роликовых опорах с подшипниками качения. Предусмотрена система гидравлических упоров, обеспечивающих автоматическое и постоянное возвратно-поступательное движение печи вдоль ее оси с перемещением на 100 мм.

Вращение печи обеспечивает привод, состоящий из электродвигателя, понижающего частоту вращения редуктора, и подвеской шестерни, входящей в зацепление с зубчатым венцом, закрепленным на корпусе печи. Разгрузочная часть печи входит в «горячую» головку, которая предназначена для сопряжения печи с холодильником и установки топливных форсунок или горелок. Противоположная разгрузочная часть печи входит в загрузочную головку через специальную уплотнение для снижения потока холода воздуха и тем самым потерю теплоты.

Каждая из двух параллельных ветвей запечных циклонных теплообменников состоит из четырех ступеней циклонов, которые расположены друг над другом и последовательно соединены между собой газоходами. Газоходы нижних ступеней циклонов соединены непосредственно с загрузочной головкой печи. К разгрузочному конусу каждого из циклонов присоединены течки, по которым сырьевая мука поступает в нижний расположенный газоход циклона. Печные газы, охлажденные в циклонных теплообменниках до 300—350° С, в дальнейшем используются в помольном агрегате для подсушки сырьевой муки, а затем направляются в систему пылеочистки и выбрасываются в атмосферу.

Температуру газов, выхлопающих из циклонных теплообменников (при отключении помольного агрегата), снижают с помощью установленки для охлаждения газов тонко распыленной водой. Использу-

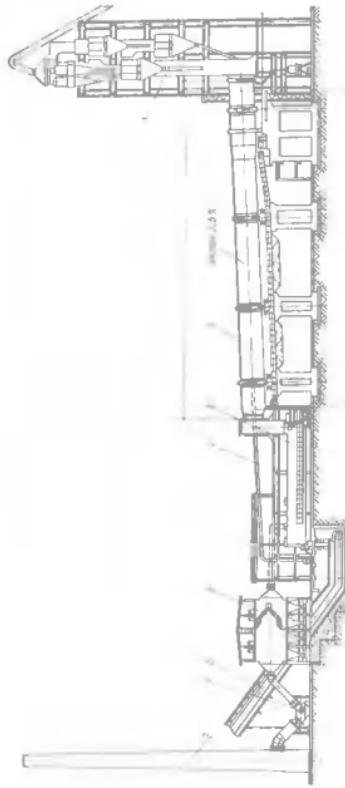


Рис. 112. Вращающийся способ производства цемента 3000 т/сут
 1 — виброподогреватель; 2 — виброподогреватель; 3 — циклонный теплообменник; 4 — газоход батарейного циклона; 5 — газоход горшка; 6 — фурнектор; 7 — конвейорный конвейор; 8 — конвейорный конвейор.

вание теплоты отходящих газов позволяет значительно снизить затраты теплоты на сушку сырьевой муки.

Техническая характеристика печного агрегата (6,4×7—85 м)

Общие показатели

| | |
|---|-------|
| Производительность агрегата, т/сут | 3000 |
| Удельный расход тепла на обжиг, кДж/кг клинкера | 3360 |
| То же, электроэнергии, кВт·ч | 18—22 |
| Общая масса агрегата (без футеровки), т | 3200 |

Вращающаяся печь

| | |
|--|-----------|
| Внутренний диаметр корпуса, м | 6,4 |
| То же, загрузочной части, м | 7 |
| Длина, м | 95 |
| Частота вращения, мин ⁻¹ | 1,33—0,6 |
| Уклон печи, % | 3,5 |
| Мощность электродвигателя привода, кВт | 2×320=640 |
| Число роликопор | 4 |

Циклонные теплообменники

| | |
|---|---------|
| Температура сырьевой муки, выходящей из теплообменников, °С | 750 |
| Температура газов, поступающих в теплообменники, °С | 1150 |
| Количество газов, поступающих в теплообменники, м ³ /ч | 191 000 |
| Температура дымовых газов на выходе из четвертой ступени циклонов, °С | 336 |
| Общая высота теплообменников, м | 71 |

Циклонные теплообменники. В настоящее время они широко применяются в производстве цементного клинкера. Для них характерна максимальная разница поверхности теплообмена извещенной в газовом потоке сырьевой муки, высокая скорость ее нагревания, сравнительная простота конструкции и надежность работы при низком удельном расходе теплоты. Для работы циклонных теплообменников не требуется предварительная гранулация сырьевой муки, что также выгодно отличает их от других запечных теплообменных устройств.

Принцип работы циклонных теплообменников заключается в следующем (рис. 114). Огкорректируванная сырьевая мука подается шнекомонусом в расходный бункер 1, затем на ленточный конвейер-дозатор 2, из которого она поступает в газоход батарейного циклона 3, где увлекается уходящими из циклона 4 газами и вместе с пылью поступает в циклон 3. Из циклона 3 осевший в нем материал поступает в циклон 4 вместе с отходящими газами циклона 5. В циклон 5 нагретая сырьевая мука попадает на циклон 4 вместе с отходящими газами циклона 6. В циклон 6 нагретая сырьевая мука поступает из циклона 5 вместе с отходящими газами из вращающейся печи 7, а во вращающуюся печь подается нагретая до температуры 700—900° С и частично декарбонизированная сырьевая мука из циклона 6.

Нижние циклоны 5 и 6 обычно футеруют изнутри огнеупором, а верхние циклоны 3 и 4 теплоизолируют снаружи. Последнюю ступень очистки газов от пыли осуществляют электрофильтрами.

Таким образом, сырьевая мука опускается вниз, проходя последовательно циклоны и газоходы всех ступеней, начиная с относительно холодной (верхней) и кончая горячей (нижней). В циклонных теплообменниках в каждой отдельно взятой ступени теплообмен между газовым потоком и материалом происходит при прямоточном их движении и при очень высокой интенсивности нагревания частиц материала, что приводит к выравниванию температур твердой и газообразной фаз. Иными словами, температура сырьевой муки в

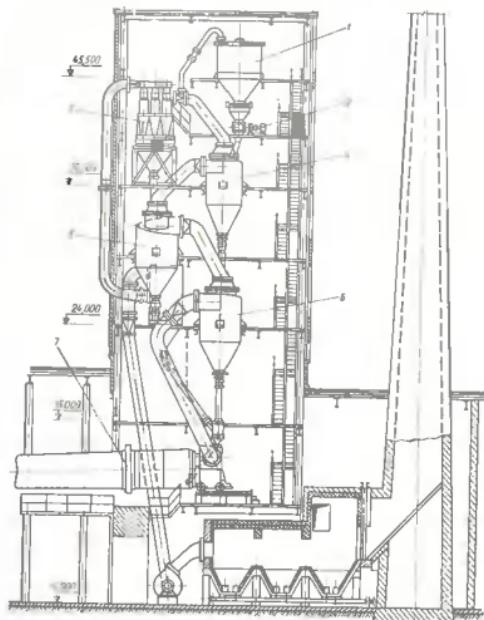


Рис. 114. Схема установки линии волокон для измерения

ходящей из циклона, практически равна температуре отходящих из этого же циклона газов. Однако путем использования приема многократного выделения твердой фазы из газовой и последующей передачи твердой фазы в инжектируемую ступень с более высоким температурным потенциалом газовой фазы создается теплообменная система, равнозначная по теплообмену перекрестному токе.

Практика показала, что для эффективного использования теплоты газов достаточно четырех или пяти ступеней циклонов. Дальнейшее увеличение ступеней циклонов приведет к еще более полной утилизации теплоты, однако, как показывают расчеты, затраты электроэнергии на преодоление гидравлического сопротивления циклонов не окупаются.

Время пребывания сырьевой муки в циклонных гейтлообменинках, по расчетным данным, не превышает 30 с, но за это время сырьева мука нагревается до 800–850° С и на 20–25% декарбонизируется. Это можно объяснить высокой интенсивностью процессов тепло- и массообмена взвешенном состоянии, которое характеризуется максимальным развитием поверхности теплопередачи и хорошим контактом твердой и газообразной фаз. Более подробное рассмотрение условий теплопередачи во взвешенном состоянии, а также имеющейся опыту эксплуатации циклонных теплообмеников позволяет считать, что при конструкторских расчетах размеров газоходов и циклонов следует принимать во внимание только требования аэродинамики и пылеэнергии газов.

Подробная методика теплового и аэродинамического расчета циклонных теплообменников изложена в соответствующей литературе [9, 10].

ПЕЧНЫЕ УСТАНОВКИ С ВЫНОСНЫМИ ДЕКАРБОНИЗАТОРАМИ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

Обычно степень декарбонизации сырьевой смеси во вращающихся печах с циклонами теплообменниками не превышает 35% на выходе из последней ступени циклонов, и поэтому окончательная декарбонизация происходит собственно во вращающейся печи. Этот процесс занимает около 40% длины печи, причем интенсивность его сравнительно низка, так как протекает в плотном слое.

Если проводить декарбонизацию во взвешенном слое в отдельном аппарате, где дополнительное скжигание тощего при температуре близкой 900—950°С, можно достичь высокой степени декарбонизации (до 80—90%), как показывает опыт работы японских декарбонизаторов в Японии. Высокая степень термической подготовки сырьевых смесей перед поступлением ее в вращающуюся печь позволяет использовать ее только для сжигания клинкера. В настоящее время в литературе встречается несколько схем обжига цементного клинкера с предварительной декарбонизацией сырьевой муки. Детальное описание указанных схем можно найти в [3]. Общий для всех известных схем с предварительной декарбонизацией сырья яв-

Рис. 115 Вращающаяся печь с циклонным теплообменником и выносным декарбонизатором

1 — вращающаяся печь; 2 — трубопровод горячего воздуха; 3 — выносной декарбонизатор; 4 — ветвь циклонов термической сепарации, работающих на отходящих газах; 5 — ветвь циклонов теплобменника, работающих на стекающей из печи горячей пылью; 6 — вентилятор для высыпания



зается то, что в классическую схему термической подготовки сырья в циклонных теплообменниках включается дополнительная диссоциационная ступень с автономным подогревом. Принципиальная схема такой установки дана на рис. 115.

Предварительный подогрев сырьевой смеси осуществляют в системе циклонных теплообменников или в аналогичных системах.

После третьей ступени циклонов подогретая сырьевая смесь до температуры примерно 750 °C поступает в реактор — декарбонизатор, а на него вместе с газовым потоком в четвертый циклон, где происходит выделение сырьевой смеси из газового потока. После этого сырьевая смесь направляется во вращающуюся печь для сушки.

Предварительная декарбонизация сырьевой муки позволила решить задачу существенного повышения единичной производительности печного агрегата порядка 10 тыс. т клинкера в сутки в существующих габаритах современных печных агрегатов.

Кроме того, в указанной схеме удается снизить тепловое напряжение в зоне спекания вращающейся печи путем перераспределения тепловых потоков между реактором-декарбонизатором и вращающейся печью. Это, в свою очередь, позволяет повысить стойкость футеровки в зоне спекания печей.

Вращающаяся печь размером 4,3 × 65 м оборудована циклонными теплообменниками системы «Дюополь» фирмы «Полизиус». Диаметр каждой ветви двух циклонов четвертой ступени (по ходу газов) двух циклонов второй ступени 4,5 м, а диаметр циклона первой ступени 3,96 м. Третья ступень теплообменной системы представляет собой вихревую шахту диаметром 5,8 м.

Декарбонизатор кипящего слоя имеет размер 4 × 4,5 м. При общем удельном расходе тепла на обогрев 3180 кДж/кг клинкера, из которых 26% приходится на долю кальцинатора. Использование

в технологической схеме диссоциационной ступени позволило повысить производительность печи на 30,9%. Некоторые параметры работы вращающейся печи с предварительной системой декарбонизации по данным эксплуатации (Япония) приведены ниже. При указанных параметрах работы печного агрегата тепловой баланс приведен в табл. 16.

Основные показатели работы печного агрегата

| | |
|---|-------|
| Вращающаяся печь. | |
| производительность, т ч | 95,4 |
| расход мазута, т/ч | 57,2 |
| расход первичного воздуха, м ³ /ч | 672 |
| температура вторичного воздуха, °C | 752 |
| Циклонный теплообменник | |
| выход отходящих газов, м ³ /т клинкера | 1420 |
| температура отходящих газов, °C | 340 |
| содержание кислорода в отходящих газах, | 3,8 |
| Клинический холодильник типа «Фуллерса» | |
| расход охлаждаемого воздуха, м ³ /т клинкера | 6840 |
| температура отходящего воздуха, °C | 240 |
| температура клинкетного слоя, °C | 171 |
| Декарбонизатор | |
| расход мазута, кг/т клинкера | 20,4 |
| расход воздуха, м ³ /т клинкера | 132 |
| температура отходящих газов, °C | 830 |
| температура кипящего слоя, °C | 818 |
| Степень декарбонизации | |
| на входе в декарбонизатор, % | 10,8 |
| на выходе из декарбонизатора | 85,3 |
| на входе в печь, % | 90—92 |

Таблица 16. Тепловой баланс работы печного агрегата (Япония)

| Приход теплоты | Расход теплоты |
|--|------------------|
| кДж/т кинкера | кДж/т кинкера |
| 1. Физическое теплосодержание топлива, поступающего в печь | 9,2 |
| 2. Физическое теплосодержание топлива, поступающего в декарбонизатор | 2,9 |
| 3. Химическая энергия топливных вращающейся печи | 2370 |
| 4. Деловая теплота первично-го воздуха | 830 |
| 5. То же, сырьевая смесь | 3,3 |
| 6. То же, отходящий воздух | 6,7 |
| 7. Холодильник | 90 |
| Итого | 3312,1 |
| | Итого |
| | 3312,1 |

В Японии разработана и успешно эксплуатируется система с декарбонизатором РСП (рис. 116). В нижней части декарбонизатора, представляющего собой шахтный вихревой кальцинатор, сжигается 90–95% всего затрачиваемого на декарбонизацию топлива. Остальное его количество подается в вихревую камеру предварительного сгорания топлива. Полностью декарбонизация завершается в смесительной камере за счет теплоты отходящих из печи газов. Сырьевая мука поступает в вихревой кальцинатор из циклонов второй ступени (по ходу газов). Воздух из колосникового холодильника для горения топлива подается раздельно в вихревую камеру и вихревой кальцинатор, где сырьевая мука завихряется в потоке высокотемпературного воздуха из холодильника. Из кальцинатора сырьевая мука попадает в смесительную камеру, где декарбонизация сырьевых муки завершается в печных отходящих газах с температурой 950–1000° С. Степень декарбонизации сырьевых муки составляет 85–95%. Установка оборудована пережимом между кальцинатором и камерой смешения, который позволяет интенсифицировать образование смеси топлива с воздухом.

На рис. 117 показана установка с декарбонизатором конструкции фирмы «Смилд» (Дания). Конструкция установки позволяет раздельно регулировать процессы, происходящие в разных ветвях циклонных теплообменников с помощью отдельных дымососов, а также изложитемпературным беспламенным горением топлива в декарбонизаторе, установленным только на одной ветви циклонных теплообменников. В одну из ветвей циклонов подают отходящие печные газы, а в другую — отходящие газы из декарбонизатора. Установка работает на мазуте, поступающем в декарбонизатор и печь в соотношении 60 : 40. Воздух для горения топлива в декарбонизаторе подается из колосникового холодильника по специальному трубопроводу. В ветви с декарбонизатором подается 60% сырьевой муки, а во вторую ветвь — остальная ее часть. Фактическая производительность печи достигла 4200 т/сут при удельном расходе теплоты 3150 кДж/кг клинкера.

В последнее время в практике цементного производства зарубежных стран используются декарбонизаторы различных типов, однако принцип их тепловой работы идентичен. Тонкомолотая сырьевая смесь, предварительно подогретая до температуры 700° С, поступает в реактор-декарбонизатор, в котором сжигается топливо при температуре, близкой к 950° С.

Процесс декарбонизации проводится или максимально развитой поверхности контакта твердой и газообразной фаз, немедленном удалении образующихся продуктов разложения карбонатной составляющей: оксида кальция и углекислого газа.

В заключение следует отметить, что обжиг клинкера в печах сухого способа производства с дополнительной ступенью декарбонизации является качественным скачком в производстве цемента, так как позволяет более чем в два раза повысить удельную производительность вращающейся печи. При этом наиболее теплонапряжен-

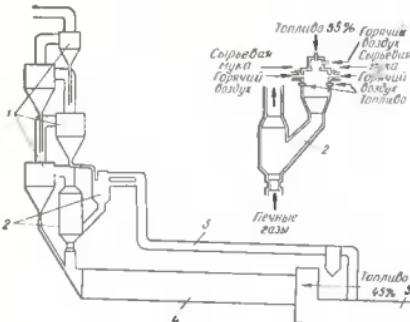


Рис. 116. Схема вращающейся печи с циклонными теплообменниками и кальцинатором РСП
1 — циклонный теплообменник; 2 — кальцинатор РСП; 3 — вихревой горячий воздух; 4 — привод вентилятора; 5 — колосниковый холодильник

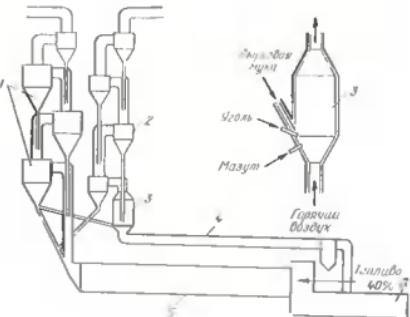


Рис. 117. Схема установки вращающейся печи с циклонными теплообменниками и кальцинатором ФЛС
1 — ветви циклонных теплообменников без кальцинатора; 2 — ветви циклонных теплообменников со встроенным кальцинатором; 3 — кальцинатор; 4 — водогодувка горячего воздуха; 5 — привод вентилятора печи; 6 — колосниковый холодильник

ный процесс вынесен из вращающейся печи в стационарный аппарат, в котором регулирование процесса декарбонизации можно осуществлять автономно.

КОНВЕЙЕРНЫЙ КАЛЬЦИНАТОР

Конвейерный кальцинатор представляет собой бесконечную движущуюся решетку, составленную из соединенных шарнирами палет-колесников с отверстиями, на которые подается слой гранул сырьевого материала. Высота слоя гранул материала на решетке обычно составляет 150–250 мм и зависит от потребностей регулирования процесса обжига. Через слой гранул материала и отверстия в колесниках просасываются печные газы.

Внутреннее пространство кальцинатора разделено перегородкой на две камеры «горячую» и «холодную». Печные газы с температурой

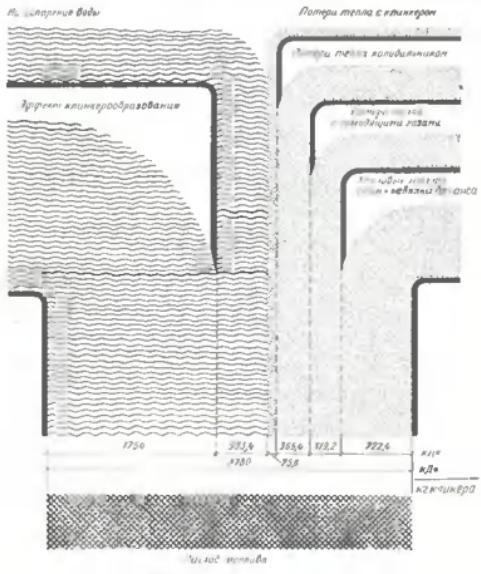


Рис. 119. Генеральный баланс печи Тополь.

1000–1100° С поступают в «горячую» камеру и за счет разрежения под решеткой, создаваемого промежуточным дымососом, просасываются через слой материала и нагревают его до температуры 800–850° С. Охлажденные печные газы до температуры 350–450° С нагреваются промежуточным дымососом в «холодную» камеру кальцинатора и снова просасываются через слой влажных гранул материала за счет разрежения под колесниковой решеткой, создаваемого основным дымососом. Здесь происходит сушка сырьевых гранул и подогрев их до температуры порядка 100–150° С. Отработанные печные газы после очистки от пыли выбрасываются в атмосферу.

Часть сырьевых гранул в процессе сушки и подогрева разрушаются и просасываются через отверстия в колесниках в подогревочное пространство, где собирается цепным конвейером и подается в сырьевой бункер для повторной транспортировки и обжига. Вращающиеся печи с конвейерными кальцинаторами в тепловом отношении очень эффективны и обеспечивают удельный расход теплоты на обжиг около 3300 кДж/кг клинкера (рис. 118). Печи Ленпол эксплуатируются в ряде промышленно развитых стран, однако широкому их применению препятствуют сложность эксплуатации и сравнительно низкая единичная мощность печных агрегатов. В последнее время созданы печные агрегаты с конвейерными кальцинаторами производительностью 3000 т клинкера в сутки. Общий вид установки с конвейерным кальцинатором двухкратного просасывания газов показан на рис. 119.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Для обжига цементного клинкера во вращающихся печах используют различные виды топлива (твердое, жидкое, газообразное).

В отечественной промышленности в настоящее время наибольшее применение находит природный горючий газ, затем твердое топливо. Некоторое количество вращающихся печей работает на мазуте, и в качестве местного топлива используются горючие сланцы. Форсуночное пылевидное топливо должно обладать необходимой удельной теплотой горения, оптимальным содержанием летучих горючих веществ, ограниченной зольностью и влажностью.

Обычно выход летучих горючих составляет 10–30% сухой массы топлива, а оптимальный выход летучих составляет 20–25%. Зольность может колебаться в пределах 10–25%. Чтобы обеспечить указанные требования к форсуночному топливу, его готовят в виде шихты, состоящей из тонких и газовых углей в соответствующей пропорции.

Особенность сжигания топлива во вращающихся печах заключается в том, что топливо должно гореть в пределах зоны спекания клинкера с температурой, обеспечивающей требуемую скорость протекания физико-химических процессов клинкерообразования. Требуется температура в зоне сушки клинкера, следовательно, будет определять температурой горения топлива, которая, в свою

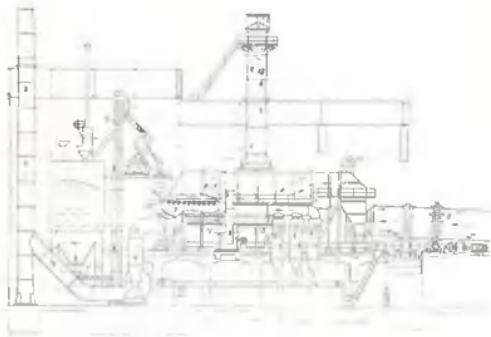


Рис. 119. Вращающаяся печь
1 — силос сырья; 2 — конвейера; 3 — газовый котел; 4 — bottom conveyor; 5 — газификационная камера; 6 — «горячая» камера; 7 — дампинг; 8 — решетка Лепомы; 9 — вращающаяся печь; 10 — «холодная» камера; 11 — дымогар; 12 — циклон; 13 — конвейер горючих; 14 — конвейер гравия; 15 — конвейер дымогаров; 16 — газогенераторник дымогаров

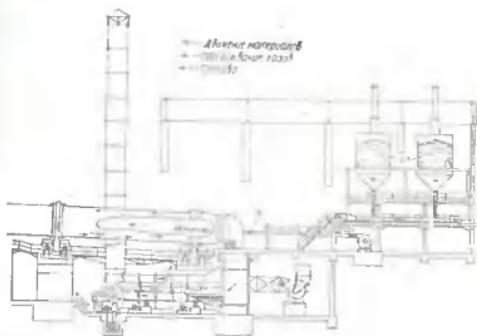
очередь, определяется интенсивностью смешивания топлива с воздухом. Указанная зависимость справедлива для всех видов тоннельных печей. Максимальная температура в зоне горения соответствует степени горения топлива, равной примерно 0,8.

Угольную пыль сжигают в одно- или двухканальных форсунках. В двухканальных форсунках (рис. 120) по центральному каналу подается воздушно-топливная смесь, а по периферийному каналу поступает вторичный воздух. Длину факела регулируют путем изменения соотношения между первичным и вторичным воздухом. Обычно количество первичного воздуха равно процентному содержанию летучих горючих в форсуночном топливе.

Режим горения топлива в значительной мере влияет на удельный расход топлива, и поэтому необходимо обеспечивать оптимальную длину зоны горения топлива, примерно составляющую пять наружных диаметров печи. Коэффициент избытка воздуха должен быть 1,05—1,15.

Для сжигания мазута во вращающихся печах применяют форсунки с механическим распылением, которые обеспечивают необходимую тонкость распыления мазута и ее регулирование.

Капли мазута при температуре примерно 150 °С начинают интенсивно испаряться и подвергаться термическому разложению, в конечном итоге, на сажу и водород. При этом в процессе горения могут одновременно участвовать продукты разложения и первичные углеводороды. Чтобы получить короткий и прозрачный факел, требует-



с конвейерным кальциниатором
ты гранулятор; 6 — течка гранул; 7 — решетка Лепомы; 8 — вращающаяся печь; 9 — ход «холодилья» камеры; 14 — дымоход; 15 — течка просыпи трубы; 16 — цепной конвейер трубы; 19 — угольный горелка; 20 — бункер угольных пыли

ся тонкое распыление мазута, сравнительно низкие скорости его вылета из форсунки и интенсивное смешивание с воздухом при повышенном его избытке. Для получения длинного светящегося факела необходимо более грубое распыление мазута при более высоких скоростях вылета его капель из форсунки. Необходимо также избежать смешивания капель мазута с воздухом и обеспечивать низкий избыток воздуха.

На рис. 121, а, б показаны два вида мазутных форсунок: игольчатая и тангенциальная. В мазутную игольчатую форсунку подается подогретый паром мазут под давлением 3 мПа. Далее мазут поступает в канал наклончика I и распыляется во вращающейся печи. Расход мазута регулируют в некоторых пределах длины факела перемещением иглы 3. В тангенциальную форсунку мазут распыляется по тангенциальному направлению к соли I, в результате создаются более благоприятные условия смешения капель мазута с воздухом. Форму факела и его длину регулируют перемещением поршня 3 по оси форсунки.

Для сжигания газообразного природного топлива во вращающихся печах применяют одноканальные регулируемые и нерегулируемые газовые горелки. В таких горелках весь воздух, необходимый для горения, поступает в печь из холодильника. Нерегулируемые одноканальные горелки работают под давлением газа 29—98 кПа, что обеспечивает скорость его истечения 200—300 м/с и интенсивное смешение газа с воздухом. Обычно такие горелки снабжают устрой-

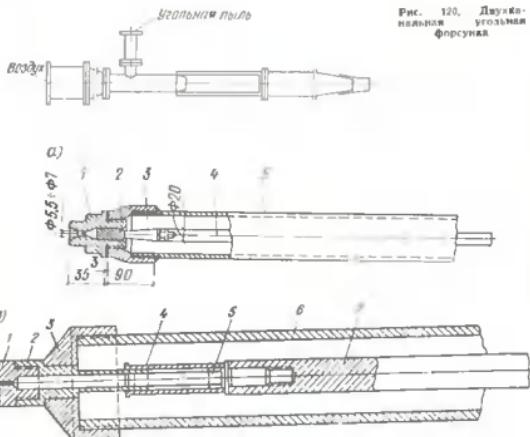


Рис. 121. Мазутные форсунки:
а — мазутная; 1 — сопло; 2 — завихритель; 3 — искра; 4 — насадка горючей смеси;
б — генераторная; 1 — сопло; 2 — камера завихрения; 3 — головка форсунки; 4 — стакан пружин; 5 — поршень; 6 — труба для вакуума 60 мм; 7 — пруток диаметром 20 мм

ствами, которые позволяют регулировать глубину выдвижения и угол наклона горелки. Это дает возможность управлять в некоторых пределах расположением зоны горения и, следовательно, линии скания клинкера в печи.

Хотя одноканальные нерегулируемые газовые горелки просты и надежны в эксплуатации, однако широкого распространения в промышленности они не получили, так как в таких горелках невозможно во время работы печи оперативно изменять положение, длину и температуру факела независимо от расхода газа и избытка воздуха.

У регулируемых горелок таких недостатков нет, так как они оборудованы устройствами, позволяющими изменять скорость вылета газовой струи и степень ее завихрения без изменения расхода газа и избытка воздуха.

Наибольшее применение получили регулируемые газовые горелки ГВП (рис. 122) и ВРГ (рис. 123). Горелки ГВП снабжены устройством, позволяющим менять площадь сечения устья в результате перемещения сердечника к стенке завихрения с помощью специально установленных лопаток. Проницаемость осевое перемещение

Рис. 120. Двухканальная угольная форсунка

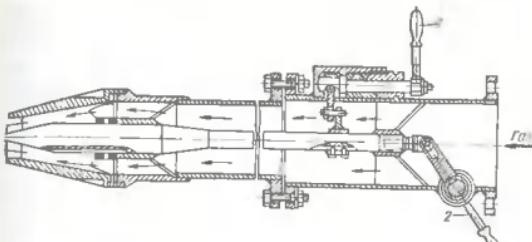


Рис. 122. Горелка ГВП

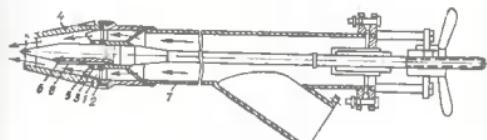


Рис. 123. Горелка ВРГ

сердечника и завихрителя, можно изменять внешние характеристики факела. В горелках ВРГ этого достигают изменением угла наклона лопаток завихрителя от 0 до 60°.

Горелка ГВП отличается повышенной надежностью в работе и позволяет регулировать длину факела в широких пределах. Однако эта горелка по сравнению с горелкой ВРГ имеет большую массу и более сложна в управлении.

Одличительная особенность горелки ВРГ — малая масса и небольшие габариты. Она проста в управлении. Поток газа закручивается в широких пределах поворотом лопаток от 0 до $\pm 45^\circ$. Конструктивный недостаток горелки: нельзя регулировать длину факела в широких пределах.

ХОЛОДИЛЬНИКИ КЛИНКЕРА

Холодильники предназначены для окончательного охлаждения клинкера после выхода его из зоны охлаждения вращающейся печи. Режим охлаждения клинкеров оказывает влияние на фазовый и минералогический его состав и поэтому может рассматриваться как

составная часть технологического процесса обжига клинкера. Клинкер охлаждают воздухом, поступающим во вращающуюся печь для сжигания топлива. Следовательно, холодильники клинкера выполняют роль тепловых утилизаторов и повышают тепловую эффективность печного агрегата.

В промышленности применяются следующие типы клинкерных холодильников: барабанные, рекуперативные и колосниковые. Барабанные холодильники используют для печей малой производительности (примерно 12–16 т/ч) и, как правило, не применяются для больших вращающихся печей.

Более широкое распространение в промышленности нашли рекуператорные холодильники. Рекуператорный холодильник представляет собой барабаны каждый диаметром 1,3 м и длиной 6 м, которые закреплены на кожухе печи. В горячей части, куда поступает клинкер из печи, рекуператоры отфурочены броневыми жаростойкими плитами из чугуна. Для интенсификации процесса охлаждения плиты имеют выступающие ребра, которые усиливают перемешивание слоя клинкера. В разгрузочной части рекуператоры сплошены полками для интенсивного пересыпания клинкера по высоте рекуператора. Иногда к полкам подвешиваются короткие цепи, которые дополнительно улучшают процесс охлаждения. Рекуператоры соединены печью с помощью патрубков из жароупорного чугуна. Охлажденный клинкер из рекуператоров разгружается через боковые отверстия с колосниками, когда они находятся в нижнем положении.

Для печей высокой производительности применяют в основном колосниковые переталкивающие холодильники. В холодильниках этого типа интенсивное охлаждение клинкера осуществляют путем продувания холодного воздуха через слой горячего клинкера. При этом конечная температура клинкера может достигать примерно 40 °С, что практически недостаточно для всех остальных типов клинкерных холодильников. Поэтому современные мощные обжиговые агрегаты оснащены, как правило, колосниковыми холодильниками клинкера.

Наружный воздух вентилятором нагнетается в подколосниковое пространство холодильника по трубопроводу, имеющему отводы в каждую камеру холодильника. Подколосниковое пространство холодильника разделено на две части непроницаемой для воздуха перегородкой. Колосниковая решетка выполнена в виде двух отдельных частей, каждая из которых приводится в возвратно-поступательное движение самостоятельным приводом. На некоторых конструкциях холодильников установлены три решетки.

На рамках края колосники, которые совершают возвратно-поступательное движение вместе с рамой. Между подвижными колосниками устанавливают неподвижные. В результате периодического возвратно-поступательного движения колосников клинкер постепенно перемещается к разгрузочному концу холодильника и попадает на колосниковый бункер. Мелкий клинкер проваливается в бункер

и поступает на конвейер, а крутий клинкер по колосникам поступает в дробилку, затем на конвейер.

Протык клинкера через отверстия в подвижных и неподвижных колосниках собирается на дне и цепным конвейером подается в бункер. Воздух из первой камеры поступает по патрубку, затем, проходя через слой горячего клинкера нагревается, подается по вращающейся печи для сжигания топлива.

Во вторую камеру воздух по патрубку проходит через слой клинкера, уже частично охлажденного, и направляется на сброс в трубу, предварительно очищенный от пыли в пылевом. Воздух из второй камеры отсыпывается специальном предназначенным для этих видов сырья.

Холодильник заключен в металлический герметизированный корпус, опущенный в верхней половине пакетами опускном для снижения потерь тепла в окружающую среду. В колосниковых холодильниках достигается быстрое и эффективное охлаждение клинкера до 40–50 °С. Охлажденный клинкер направляется в помольное отделение. Недостатком этих холодильников следует считать то, что они требуют воздуха для охлаждения клинкера в 2,5–3 раза больше, чем для горения топлива.

Поэтому начинают находить применение более усовершенствованные колосниковые холодильники с последовательным использованием воздуха, идущего из первой камеры во вторую. В результате повышается тепловой коэффициент холодильника и снижается удельный расход теплоты на обжиг клинкера за счет подогрева воздуха до более высокой температуры.

На рис. 124 приведен колосниковый холодильник «Волга-125 С» с двойным просом воздуха. Он предназначен для охлаждения воздухом клинкера до температуры 60–90 °С при выходе его из печи с температурой 1200–1300 °С. Клинкер охлаждают воздухом, продуваемым через слой этого клинкера, перемещающегося вдоль по колосниковой решетке.

Клинкер, выходящий из печи, падает на колосники острого дутья, где он охлаждается воздухом, нагнетаемым вентилятором высокого давления. При этом средние и мелкие куски клинкера увеличиваются воздушными струями на некоторую высоту, а при падении их на решетку происходит равномерное распределение слоя материала по ширине решетки. Затем клинкер поступает на основную горизонтальную колосниковую решетку, по которой он перемещается в результате возвратно-поступательного движения колосников, при этом клинкер охлаждается воздухом, нагнетаемым вентиляторами среднего давления.

Воздух, проходя слой клинкера в холодной камере холодильника, нагревается до температуры 180 °С, очищается от пыли в пылеулавливающем устройстве и затем дымососом подается под колосниковую решетку горячей зоны холодильника. Вторично проходит через слой более горячего клинкера, воздух дополнительно нагревается и поступает в печь с температурой 500–650 °С.

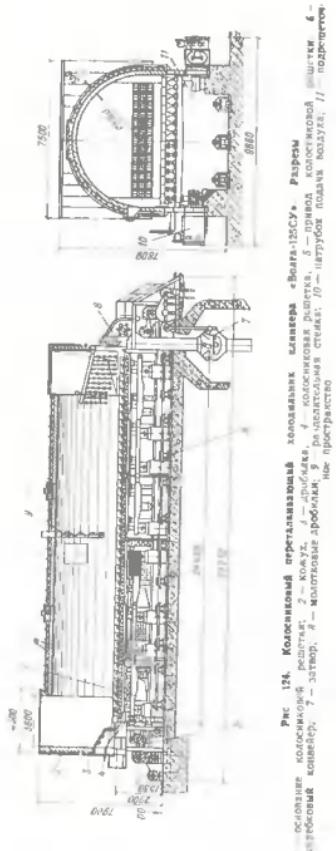


Рис. 124. Колесничный перегревательный холодильник «Волта-125 СУ». Рисунок показывает схему подачи воздуха в колесничную решетку. 1 — основание колесничной решетки; 2 — колодец; 3 — дробилка; 4 — колесничная решетка; 5 — пылевой колесничный шнек; 6 — шнек; 7 — разгрузочный ствол; 10 — шнек для подачи воздуха; 11 — подача горячего воздуха.

С помощью специальной системы жалюзийных затворов можно регулировать количество и температуру воздуха, подаваемого шнеком под колесничную решетку горячей зоны холодильника, затем в устройство острого дутья. Конструкция холодильника предусматривает возможность его работы в режиме однократного просасывания воздуха, если такая необходимость возникнет.

Крупные куски клинкера, прежде чем попасть на конвейер, дробят в дробилке, установленной на разгрузочном конце холодильника. Для снижения непроизводительных затрат электроэнергии на привод дробилки клинкера предварительно классифицируют по фракциям. Мелкие фракции клинкера непосредственно поступают на конвейер. Для удаления просыпи клинкера из подрешеточного пространства предусмотрены скребковые конвейеры.

Техническая характеристика холодильника «Волта-125 СУ»

| | |
|---|---------|
| Производительность, т/ч | 125 |
| Площадь колесничной решетки, м ² | 145,3 |
| Температура клинкера на выходе из холодильника, °С | 60—90 |
| Расход воздуха на охлаждение клинкера, м ³ /кг | 1,8—2 |
| Температура вторичного воздуха, поступающего из холодильника в печь, °С | 500—550 |
| Масса (без футеровки), т | 514 |
| Общая мощность электроприводов, кВт | 1130 |

В мировой практике нашли некоторое применение клинкерные холодильники «Рекуполь» с бесконечной конвейерной решеткой (рис. 125).

Принцип их работы в тепловом и аэродинамическом отношении немногим отличается от принципа работы колесничевых передатывающих холодильников. Стой клинкера в этом холодильнике перемещается в результате движения бесконечной конвейерной ленты, собранной из дырчатых палет. Преимуществом этих холодильников по сравнению с колесничевыми следует, по-видимому, считать более высокую надежность работы конвейерной решетки. До последнего времени холодильники «Рекуполь» выпускались для печей сравнительно малой производительности, а сейчас началось производство таких холодильников для печей производительностью 3000 т/сут, что свидетельствует о их конкурентоспособности с другими типами холодильников клинкера.

ТИГО-ДУТЬЕВЫЕ УСТРОЙСТВА

Для подачи во вращающиеся печи первичного воздуха, который обычно должен быть транспортирующим агентом для пылеугольного топлива или для продувки слоя клинкера на колесничевой решетке холодильника, применяют центробежные вентиляторы среднего и высокого давления в зависимости от расчетного сопротивления тракта и необходимой производительности. При этом действительный напор вентилятора и его производительность по паспортным данным

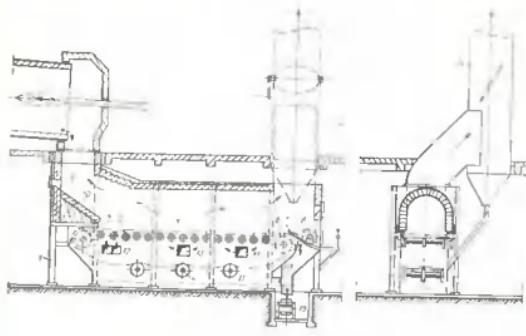


Рис. 125. Холодильник с конвейерной решеткой

1 — корпус; 2 — роликовый конвейер; 3 — конвейерные бесконечные решетки; 4 — спорные решетки; 5, 6 — ведущие ролики; 7 — направляющие панели; 8 — молотковая дробилка; 9 — щека; 10 — телки клинкера; 11 — конвейер для удаления просыпки; 12 — воздушный канал "горячей" камеры; 13 — воздушные каналы "холодной" камеры; 14 — труба; 15 — конвейер для подачи клинкера на склад

должен выбираться с запасом до 30% относительно расчетных значений.

Для создания тяги, г. е. транспортирования газового потока по печному тракту, применяют дымососы. Это тоже центробежные вентиляторы, характеристики которых рассчитаны на рабочую температуру 200 °С. Полный напор вентилятора должен обеспечивать преодоление сопротивления печного тракта, включая сопротивление планетарных или барабанных холодильников. В случае применения колосниковых или иных типов холодильников клинкера, работающих с поддувом воздуха, дымосос должен обеспечивать разжение в горячей головке печи, равное 0 или немного больше.

Методика расчета вентиляторов и дымососов, а также их характеристики приводятся в соответствующей литературе [9, 10].

ПИТАТЕЛИ ШЛАМА

Для печей мокрого способа производства наибольшее распространение получили объемные ковшовые питатели с дистанционным регулированием производительности. Питатели этого типа просты по конструкции, надежны в работе и обеспечивают достаточную точность дозировки и стабильность питания.

Принцип работы питателя следующий (рис. 126): шлам по трубопроводу 3 поступает в корпус 4, где поддерживается постоянный

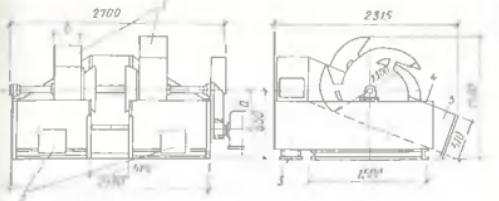


Рис. 126. Ковшовый питатель шлама. Разрезы
1 — ковши, 2 — слив шлама, 3 — шламовый трубопровод, 4 — корпус, 5 — наклонная течка

уровень шлама за счет его слива по патрубкам 2. Вращающиеся ковши 1 захватывают шлам и сливают его через отверстия в наклонную течку 5, из которой шлам подается во вращающуюся печь самотеком. Для периодического контроля производительности питателя имеется мерный бак, уровень которого фиксируется по электросекундомеру.

В отечественной промышленности нашли некоторое распространение реактивные питатели шлама, которые обеспечивают более высокую стабильность питания печей шламом.

Для печей сухого способа производства стабильность питания сухой сырьевой смесью имеет еще большее значение, чем для печей мокрого способа производства. Как известно, температурный и технологический режимы работы печей с циклическим теплобменниками весьма критичны к равномерности питания сырьевой смесью. Поэтому в качестве питателей в этих случаях используют весовые ленточные дозаторы с автоматическим регулированием производительности.

§ 29. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ ЦЕМЕНТООБЖИГАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ

Тепловая эффективность работы вращающейся печи может быть определена путем составления теплового баланса статей прихода и расхода теплоты. Из уравнения теплового баланса определяют удельный расход теплосыпучих материалов, по которому и судят об экономической эффективности процесса обжига.

Структура теплового баланса, представленная в виде статей прихода и расхода теплоты, позволяет наглядно определить источники потерь теплоты и разработать меры по возможному их сокращению, а также вычислить коэффициент полезного действия печного агрегата. Составление теплового баланса предшествует расчет

удельных материальных потоков, соотношение которых представляет собой материальный баланс процесса обжига.

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

ПРИХОДНЫЕ СТАТЫ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

1. Выход клинкера 1 кг

В инженерных расчетах цементообжигательных печей принято обычно вести расчет материального и теплового балансов на единицу массы готовой продукции. Следует иметь в виду, что это допущение не носит принципиального характера.

2. Выход CO_2^c , кг/кг клинкера, из сырьевой смеси

$$\dot{G}_{\text{CO}_2}^c = \frac{\text{CO}_2^c}{100} [G_c^c - (G_c - G_c^c) \beta], \quad (95)$$

где CO_2^c — содержание связанного в карбонатах сухой сырьевой смеси углекислого газа, %;

$$\text{CO}_2^c = \frac{M_{\text{CO}_2} \text{CaO}^c}{M_{\text{CaO}}} + \frac{M_{\text{CO}_2} \text{MgO}^c}{M_{\text{MgO}}} = \quad (96)$$

где M_{CO_2} , M_{CaO} , M_{MgO} — молекулярные массы; β — степень полноты декарбонизации флюзогравитационного уноса (обычно в расчете принимают равной 0,5); CaO^c , MgO^c — содержание окиси кальция и окиси магния в сухой сырьевой смеси, % (принимают по данным химического анализа сырьевой смеси),

или м³/кг клинкера

$$V_{\text{CO}_2}^c = G_{\text{CO}_2}^c / V_{\text{CO}_2}.$$

3. Выход влаги из сырьевой смеси: а) физической влаги, кг/кг клинкера,

$$\text{или } \text{м}^3/\text{кг клинкера}, \quad \begin{cases} G_w^f = G_{\text{CO}_2}^c - G_c, \\ V_w^f = G_w^f / V_{\text{CO}_2}. \end{cases} \quad (97)$$

б) химически связанный (гидратной) влаги, кг/кг клинкера,

$$\text{или } \text{м}^3/\text{кг клинкера}, \quad \begin{cases} G_w^h = 0.0035 G_c \text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_12, \\ V_w^h = G_w^h / V_{\text{CO}_2}. \end{cases} \quad (98)$$

4. Безвозвратный унос пыли из сырьевой смеси, кг/кг клинкера,

$$G_{\text{шн}}^c = (G_c - G_c^c) [1 - (n.p.n)^c \beta] \cdot 10^{-2}, \quad (99)$$

где $(n.p.n)^c$ — потери массы сырьевой смеси при прокаливании, %

5. Выход отходящих газов:

а) выход топочных газов при сгорании твердого и жидкого топлива, м³ (V) или кг (G) на 1 кг топлива:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{CO}_2}^t &= 0.0187 C^p; \quad G_{\text{CO}_2}^t = V_{\text{CO}_2}^t V_{\text{CO}_2}; \\ V_{\text{SO}_2}^t &= 0.007 S; \quad G_{\text{SO}_2}^t = V_{\text{SO}_2}^t V_{\text{SO}_2}; \\ V_{\text{N}_2}^t &= 0.79 V_B + 0.08 V^p; \quad G_{\text{N}_2}^t = V_{\text{N}_2}^t V_{\text{N}_2}; \\ V_{\text{O}_2}^t &= 0.21 (\alpha - 1) V_B; \quad G_{\text{O}_2}^t = V_{\text{O}_2}^t V_{\text{O}_2}; \\ V_{\text{H}_2\text{O}}^t &= 0.112 H^p + 0.0124 W^p; \quad G_{\text{H}_2\text{O}}^t = V_{\text{H}_2\text{O}}^t V_{\text{H}_2\text{O}}; \end{aligned} \right\} \quad (100)$$

б) выход топочных газов при сгорании газообразного топлива, м³ на 1 м³ горячего газа:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{CO}_2}^t &= 0.01 [CO + CO_2 + CH_4 + m(C_m H_n)]; \\ V_{\text{N}_2}^t &= 0.79 V_B + 0.01 N_2; \\ V_{\text{O}_2}^t &= 0.21 (\alpha - 1) V_B; \\ V_{\text{SO}_2}^t &= 0.01 N_2 S; \\ V_{\text{H}_2\text{C}}^t &= 0.01 \left(H_2 + 2CH_4 + \frac{n}{2} C_m H_n + H_2S + H_2O \right); \end{aligned} \right\} \quad (101)$$

в) суммарный выход топочных газов, м³ или кг на 1 кг клинкера:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{бр}}^t &= V_{\text{CO}_2}^t + V_{\text{SO}_2}^t + V_{\text{N}_2}^t + V_{\text{O}_2}^t + V_{\text{H}_2\text{O}}^t; \\ G_{\text{бр}}^t &= G_{\text{CO}_2}^t + G_{\text{SO}_2}^t + G_{\text{N}_2}^t + G_{\text{O}_2}^t + G_{\text{H}_2\text{O}}^t; \end{aligned} \right\} \quad (102)$$

г) общий выход отходящих газов из топлива и сырья, м³/кг клинкера,

$$V_{\text{бр}} = V_{\text{бр}}^t + V_{\text{CO}_2}^e + V_w^h + V_w^f + V_{\text{шн}}^c, \quad (103)$$

где $V_w^h = G_w^h / V_{\text{CO}_2}$ — расход влаги воздуха $\left(G_w^h = G_w x^h \frac{d}{1000} \right)$; d — влагогодорожание воздуха, г/кг.

В случае работы печи по замкнутому циклу с углеприготовительной установкой в нее поступают топочные газы сушильной установки, что необходимо учитывать;

д) количество уносимой и теряемой с газами золы топлива, кг/кг клинкера,

$$G_{\text{шн}}^z = [(1 - \alpha) x^h A^p] / 100, \quad (104)$$

где α — доля золы топлива, оставшаяся в печи

В целом безвозвратный унос пыли, кг/кг клинкера, будет равен

$$G_{\text{шн}}^z = G_{\text{шн}}^c + G_{\text{шн}}^h, \quad (105)$$

РАСХОДНЫЕ СТАТЬИ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

1. Расход топлива x^t , кг/клинкера или m^3 /кг клинкера, при расчете материального баланса является величиной неизвестной и определяется при решении уравнения теплового баланса.

2. Расход сырья с учетом безвозвратного уноса:

а) расход сухого сырья, кг/кг клинкера, с учетом безвозвратного уноса сырья

$$G_c = G_c^t \cdot 100 / (100 - a_{yu}); \quad (106)$$

б) расход влажной шихты, кг/кг клинкера, с учетом безвозвратного уноса сырья

$$G_{cw} = G_c \cdot 100 / (100 - W_c), \quad (107)$$

где a_{yu} — унос сырья, % от расхода сухого сырья; W_c — влажность шихты, %; $G_c^t = (100 - a_{yu}G_c A)/[100 - (n \cdot n)^c]$.

(здесь G_c^t теоретический расход сырья с учетом присадки золы топлива).

3. Теоретический расход сухого воздуха;

а) при горении твердого или жидкого топлива, $m^3/\text{кг топлива}$

$$V_0 = \frac{8.3 C^P + 8 H^P + (S^P - O^P)}{1,429 \cdot 0,21 \cdot 100}; \quad (108)$$

б) при горении газообразного топлива, m^3/m^3 газа

$$V_0 = \frac{1}{2x} \left[2 \text{CH}_4 + 0.5 \text{H}_2 + 0.5 \text{CO} + \left(m + \frac{n}{4} \right) \text{C}_m \text{H}_n + 1.5 \text{H}_2\text{S} - \text{O}_2 \right]. \quad (109)$$

4. Действительный расход сухого воздуха, m^3 или $\text{кг}/\text{кг топлива}$:

$$V_B = V_0 \alpha; \quad c_B = V_B V_B, \quad (110)$$

где α — коэффициент избытка воздуха в зоне горения топлива ($\alpha = 1.06 \dots 1.15$).

Полученные результаты расчетов статей материального баланса следует далее свести в таблицу, где в левой части надо привести статьи расхода, а в правой — статьи прихода.

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

Приходные статьи теплового баланса, кДж/кг клинкера:

1. Приход теплоты в результате горения топлива

$$q = x^t Q_h^t, \quad (111)$$

2. Приход с физической теплотой топлива

$$Q_\Phi^t = x^t c_T t_T, \quad (112)$$

3. Приход с физической теплотой сырья

$$Q_c = (G_c c_c + G_w^\Phi) t_c, \quad (113)$$

4. Приход с физической теплотой воздуха:

а) с первичным воздухом

$$Q_{w1}^t = x^t V_B k_{w1} t_{w1}^n, \quad (114)$$

б) с вторичным воздухом

$$Q_{w2}^t = x^t V_B (1 - k) c_{w2} t_{w2}^n, \quad (115)$$

где k — доля первичного воздуха.

При выборе значения k следует ориентироваться следующими данными:

| Вид топлива | Доля первичного воздуха k |
|--------------|-----------------------------|
| твердое | 0,2—0,3 |
| жидкое | 0,1—0,25 |
| газообразное | 0—0,25 |

Расходные статьи теплового баланса, кДж/кг клинкери.

I. Теоретический расход теплоты q^t .

Теоретический расход теплоты на обжиг вычисляют по тепловому балансу, при котором все продукты, входящие в процесс обжига и выходящие из него, имеют условную температуру, °С. Следовательно, теоретический расход теплоты на обжиг представляет собой алгебраическую сумму теплот физико-химических превращений в сырьевой смеси в процессе обжига. Методика расчета теоретической эффекта клинкерообразования изложена в [9, 10].

2. Расход теплоты на испарение влаги из сырьевой смеси

$$Q_w = G_w^\Phi Q_h, \quad (116)$$

где Q_h — теплота парообразования при 0°C, кДж/кг влаги.

3. Потери теплоты с отходящими газами

$$Q_{o,r} = (\Sigma V^r) x^t + \Sigma V^c I_{o,r}, \quad (117)$$

где ΣV^r — сумма компонент отходящих газов в результате сжигания топлива, $m^3/\text{кг топлива}$; ΣV^c — сумма компонент отходящих газов в результате декарбонизации сырьевой смеси и сушки ее, $m^3/\text{кг клинкера}$.

4. Потери теплоты с клинкером, выходящим из холодильника.

$$Q_{k,cl} = c_{kl} I_{kl}, \quad (118)$$

где c_{kl} — теплоемкость клинкера, кДж/(кг · К); I_{kl} — температура клинкера на выходе из холодильника, °С.

5. Потери теплоты с пылеуносом

$$Q_{un} = G_{un} c_{un} I_{o,r}. \quad (119)$$

6. Потери теплоты корпусом печи в окружающую среду.

Потери теплоты корпусом печи в окружающую среду при хорошем состоянии огнестойкой футеровки составляют 15—30% удельного расхода теплоты на обжиг

$$Q_{o,e} = (0,15 \dots 0,3) x^t. \quad (120)$$

Приведенная формула может быть использована только для приближенных расчетов. Более точный расчет тепловых потерь корпуса

сом печи в окружающую среду следует проводить по специальным методикам [9, 10].

На основании произведенных расчетов членений статьи теплового баланса можно составить уравнение теплового баланса и определить удельный расход топлива на процесс обжига.

Уравнение теплового баланса в общем виде будет иметь вид

$$\Sigma Q_{\text{прик}} - \Sigma Q_{\text{расх}} = (121)$$

или в развернутом виде

$$q^T Q_h^T - Q_h^T - Q_h^P + Q_h^E = q^T + Q_e^E - Q_{\text{на}} - Q_{\text{ун}} - Q_{\text{вн.с.}} \quad (122)$$

Из формулы (122) можно определить удельный расход топлива q^T . Результаты расчетов по тепловому балансу сводят в таблицу, которая наглядно иллюстрирует структуру теплового баланса.

§ 30. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Тепловая эффективность работы печного агрегата характеризуется тепловыми и технологическими коэффициентами полезного действия. Указанные коэффициенты можно вычислить по данным теплового баланса как отношение полезно затраченной теплоты к всей теплоте, внесенной в печь. В первом случае полезно затраченной теплоте относится теплота, затраченная на теоретический эффект клинкерообразования и испарение физической влаги сырья, а во втором — только на теоретический эффект клинкерообразования.

Тепловой коэффициент полезного действия η_1 , %,

$$\eta_1 = \frac{(q^T + Q_e^E)}{\Sigma Q_{\text{прик}}} \cdot 100. \quad (123)$$

Технологический коэффициент полезного действия η_2 , %,

$$\eta_2 = (Q_e^E/q) \cdot 100. \quad (124)$$

§ 31. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ПЕЧИ

Расчет новой вращающейся печи заключается в том, чтобы по заданной производительности и удельному расходу теплоты на обжиг определить основные конструктивные размеры этой печи. Для действующих вращающихся печей требуется пропести поверочный расчет с целью определения более рационального теплового режима работы этих печей.

В настоящее время еще нет строгих функциональных зависимостей для выполнения таких расчетов. Поэтому приходится прибегать к эмпирическим соотношениям, использование которых требует определенного практического опыта и инженерной интуиции.

Первоначально следует рассчитать тепловую мощность печи, которая увязывает диаметр печи с ее производительностью и удельным расходом теплоты.

Тепловая мощность вращающейся печи может быть определена по формуле

$$Q = Gq, \quad (125)$$

где Q — тепловая мощность печи (ГВт); G — производительность печи (кг/ч); q — удельный расход теплоты на обжиг (Ккал/кг известики).

Следовательно, из выражения (125) следует, что тепловая мощность полностью определяет производительность вращающейся печи при заданном удельном расходе теплоты на обжиг. Иструдно заметить, что улучшение или использование теплоты в печи, т. е. снижение удельного расхода теплоты на обжиг при постоянной тепловой мощности, способствует увеличению производительности печи.

С другой стороны, тепловая мощность печи определяется физической возможностью сжечь в топочном объеме соответствующее количество гоплива. Если топочный объем обозначить V_t , м³, а объемное тепловое напряжение горения топлива q_V , то тепловая мощность печи может быть определена по выражению:

$$Q = V_t q_V. \quad (126)$$

Обычно объемное тепловое напряжение горения топлива во вращающейся печи находится в пределах 0,31—0,35 ГВт/м³.

Статистическая обработка показателей работы вращающихся печей позволила установить эмпирическую связь между тепловой мощностью вращающейся печи и диаметром ее в зоне горения топлива, указанная зависимость имеет вид

$$Q = k D^3, \quad (127)$$

где k — коэффициент, равный для печей мокрого способа 1,1, для печей сухого способа 0,4—0,5; D — диаметр печи, м.

Пользуясь формулами (123) — (127), можно рассчитывать с достаточной точностью объем зоны горения топлива, диаметр печи в зоне горения топлива и длину зоны горения топлива.

Для современных типов вращающихся печей мокрого способа производства цемента отношение длины печей к их диаметру находится в пределах 32—40, а для печей сухого способа это отношение имеет значение в среднем 15.

По опытным данным длина зоны горения топлива для печей мокрого способа производства может быть приближенно определена, ч.

$$L_r \approx (4—5) D; \quad (128)$$

для печей сухого способа обжига

$$L_r \approx (2—4) D. \quad (129)$$

Полученные в результате расчетов основные данные по удельному расходу топлива, выходу отходящих газов, расходу воздуха, расходу воды дают возможность определить соответствующие

Часовые расходы и выходы. Расчет гидравлического сопротивления вращающихся печей и комплектующего оборудования можно выполнить по методике, изложенной в [9, 10].

На основании проведенных расчетов можно произвести выбор типа вспомогательного оборудования (тягодутьевые устройства, холодильников клинкера, пылеочистных устройств и др.) и составить техническую характеристику печного агрегата. Подробная методика расчета размеров вращающейся печи изложена в [9, 10, 33].

§ 32. ПЫЛЕОЧИСТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Вращающиеся печи являются источником выделения пыли. Обычно это запыленные отходящие газы вращающихся печей и, в случае использования колосниковых холодильников с однократным присосом воздуха, запыленный воздух из второй камеры холодильника. Свойства аэрозолей могут существенно изменяться при сравнительно незначительных изменениях технологического режима обжига, а также химического состава сырья и топлива.

Эти причины могут существенно изменять эффективность работы высульягивающих устройств. Кроме того, особенно большое значение на эффективность работы пылеочисточных устройств оказывает начальная запыленность газового потока на входе в пылеочистное устройство. Следовательно, для более эффективной очистки запыленных газов перед выбросом их в атмосферу необходимо строжайшим образом поддерживать технологические нормативы процесса обжига с целью снижения запыленности этих газов.

При этом следует уделить внимание необходимым мерам по уменьшению образования пыли в печи. Этого можно достигнуть путем использования рациональных цепных завес и теплообменников, которые, как показывает опыт, могут в 3–5 раз снизить запыленность отходящих газов и их температуру до оптимального значения. Для печей сухого способа производства к этим мерам следует отнести предварительное увлажнение газов и их дополнительное охлаждение перед вводом в пылеочистное устройство.

Обычно для обессыливания отходящих из печи газов применяют электрофильтры, которые обеспечивают степень очистки газов до допускаемых санитарными нормами. Используют горизонтальные трех- и четырехпольные электрофильтры с двумя или более секциями параллельного включения.

Многосекционность электрофильтров упрощает текущие ремонты и позволяет безболезненно отключать от работы любую из секций. Основные части электрофильтров: осадительные и коронирующие электроды, агрегаты питания выпрямленным током высокого напряжения, газораспределительные устройства и механизмы встраивания электродов.

Характеристика электрофильтров типа УГТ, применяемых для обессыливания газов с температурой 250–450° С, по данным Гипро-газоочистки, приведена в табл. 17.

Таблица 17. Характеристика электрофильтров

| Типоразмер | Число | | Площадь поверхности осаждения, м ² | Активная длина электродов, м | Габариты (без диффузора и коммуникаций) | |
|-------------|--------|---------|---|------------------------------|---|-----------|
| | полев. | газовая | | | днища, м | высоты, м |
| УГТ-1-150-3 | 3 | 16 | 30 | 1843 | 7,5 | 14 |
| УГТ-1-40-3 | 3 | 22 | 40 | 2509 | 7,5 | 14 |
| УГТ-1-60-3 | 3 | 33 | 60 | 3727 | 7,5 | 14 |
| УГТ-1-80-3 | 3 | 44 | 80 | 4945 | 7,5 | 12 |

Среднюю скорость газов в активной зоне электрофильтров следует принимать для вращающихся печей мокрого и полусухого способов производства не более 1,2 м/с и для печей сухого способа производства не более 0,8 м/с.

Для обессыливания запыленного воздуха колосниковых холодильников применяют рукающие тканевые фильтры, а в последнее время — фильтры с пылевыми зернистым слоем в сочетании с цинклонами.

§ 33. ШАХТНЫЕ ПЕЧИ

В индустриально развитых странах шахтные печи для обжига клинкера в настоящее время применяют мало вследствие более низкой по сравнению с вращающимися печами производительности.

В современных шахтных печах процесс получения клинкера полностью механизирован и протекает непрерывно. Поэтому такие печи получили название автоматических. Большинство автоматических шахтных печей работает по способу «черного» брикета, который получается в результате перемешивания тонкоизмолотых сырьевой смеси и короткопламенного твердого тональца с последующим фрикционированием слегка увлажненной массы.

Шахтная печь (рис. 127) состоит из цельносварного корпуса 1, отфутерованного в верхней, наиболее горячей части огнеупорным кирпичом 2, а в нижней, наиболее подверженной абразивному действию цементного клинкера, чугунными кольцами 3. Разгрузку цементного клинкера производят в нижней части шахты с помощью разгрузочного устройства 4, которое выполнено в виде колосниковой вращающейся решетки. Клинкер, отделившийся колосниковой решеткой, поступает в трехшлюзовый затвор 5, назначение которого заключается в предотвращении потерь скатого воздуха, поступающего по трубопроводу 6 от грубовоздушувки.

Для интенсификации горения топлива и более качественного распределения спекания клинкера по сечению шахты применяется фурменное дутье 7. Воздух нагнетается под колосниковую решетку под давлением 1500–2000 кПа. В верхней части печи устанавливают загрузочное устройство, которое одновременно обеспечи-

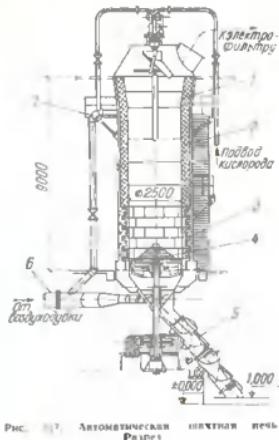


Рис. 7. Автоматическая шахтная печь

более высокое качество извести, однако узелный расход тощина в несколько выше, чем при использовании твердого топлива. Подробное описание конструкции шахтных известообжигательных печей дано в книге Д. Я. Мазурова [24].

§ 44. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КЛИНКЕРА

Автоматизация процесса обжига клинкера является одним из средств интенсификации его с целью повышения производительности обжиговых агрегатов, экономии энергозатрат, а также существенного улучшения качества продукции.

Автоматизацию печных агрегатов осуществляют по трем основным направлениям:

автоматический контроль технологических и теплотехнических параметров обжигового агрегата, который позволяет объективно оценить процесс обжига и контролировать его ход в каждый конкретный момент времени;

централизованное дистанционное управление электроприводами, регулирующими и переключающими органами. При централизованном управлении обязательно применяются автоматическая прерывистая сигнализация и блокировка взаимосвязанных механизмов;

автоматическая стабилизация параметров процесса обжига и его автоматическое регулирование.

Автоматизация производственных процессов базируется на применении показывающих, регистрирующих (интегрирующих) приборов, регистрирующих устройств различных систем и управляющих вычислительных устройств с целью оптимального централизованного управления технологическими процессами.

Обжиг клинкера является сложным технологическим процессом, где последовательное протекание физико-химических превращений обусловливается температурным уровнем обжигаемого материала по длине вращающейся печи. Поэтому каждое последующее необходимое физико-химическое превращение сырьевого материала в значительной мере зависит от полноты завершения предыдущего.

Как показывают опытные данные, время транспортирования материала по длине печи соизмеримо с частотой возмущающий процесса. Это вызывает определенные противоречия в требованиях управления процессом, например в зоне сканирования и зоне подготовки.

Основные возмущения процесса обжига клинкера, определяющие характер его протекания, вызываются изменениями качества шлама, его расхода, изменениями в соотношении тощина с воздухом и температурой его подогрева.

В настоящее время широко используются системы автоматической стабилизации входных параметров печи, температура по длине печи и избыток воздуха в отходящих газах.

Стабилизация входных параметров печи обжига клинкера. Практически недостижима полная стабилизация возмущающих факторов. Поэтому обеспечивают максимально возможную стабилизацию определенной части возмущающих факторов, а для остальных устанавливают допустимые предельные отклонения, при которых не наблюдается расстройства хода печи.

Расход шлама регулируется изменением частоты вращения центрального шламового питателя или использованием реактивных питателей шлама, которые по своей сути обеспечивают высокую степень стабилизации расхода шлама.

Стабилизация давления газообразного или жидкого топлива для печи предпочтительней путем установки отдельных регуляторов перед форсункой каждой печи. В качестве регулятора давления газа применяют регуляторы прямого действия, которые устанавливают до измерительной диафрагмы. Для регулирования давления мазута используют двухпозиционные регуляторы.

Автоматическую стабилизацию температуры в печи осуществляют путем изменения этой температуры в трех основных технологических зонах печи: сушки, кальцинирования и спекания. Для стабилизации температурного режима применяют два регулирующих устройства путем изменения подачи тощина и воздуха — эти воздействия осуществляют в узких пределах вследствие необходимости соблюдать требуемый коэффициент избытка воздуха.

Стабилизацию температуры отходящих газов осуществляют для сохранения постоянного режима сушки шлама. Датчиком является температура в пылеосадительной камере. Регулируют ее путем воздействия на жалюзиный шибер или на направляющий аппарат дымососа.

Регулятор температуры материала в зоне кальцинирования поддерживает заданное соотношение между показаниями термонари и расходом топлива.

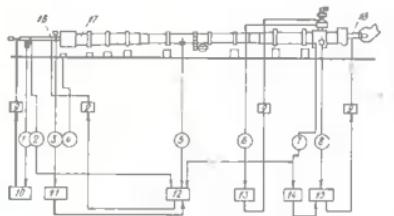


Рис. 128. Блок-схема автоматической стабилизации выходных параметров температурного режима печи и избытка воздуха
1 — давление газа; 2 — расход газа; 3 — температура в зоне сушки; 4 — температура мес-са; 5 — температура в зоне кальцинирования материала; 6 — расход шлама; 7 — содержание кислорода в отходящих газах; 8 — температура отходящих газов; 9 — исполнительные ме-ханические; 10 — ре-гулятор давления газа; 11 — регулятор температуры зоны спекания; 12 — регулятор расхода шлама; 13 — регулятор избытка воздуха; 15 — регулятор температуры отходящих газов; 16 — поворотные ре-гулирующие заслонки; 17 — печь; 18 — жалюзиные шибера

Регулятор давления газа: 11 — регулятор температуры зоны спекания, 12 — регулятор температуры зоны кальцинирования, 13 — регулятор расхода шлама, 14 — регулятор избытка воздуха, 15 — регулятор температуры отходящих газов, 16 — поворотные ре-гулирующие заслонки, 17 — печь, 18 — жалюзиные шибера

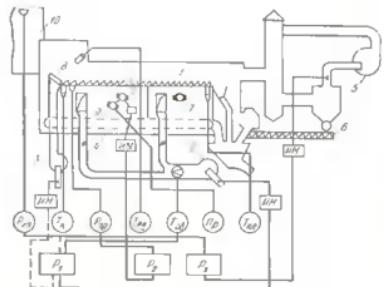


Рис. 129. Блок-схема автоматического контроля параметров процесса в печи с циклическими теплообменниками
1 — расход газа; 2 — радиационный термометр; 3 — разрежение в горячей головке печи; 4 — температура вторичного воздуха; 5 — температура в зоне кальцинирования; 6 — расход шлама; 7 — температура перед измельчением; 8 — температура при измельчении материала на выходе во вращающуюся печь; 9 — температура измельченного материала; 10 — температура газов за измельчением; 11 — давление и содержание кислорода в отходящих газах; 12 — давление и содержание кислорода в воздухе; 13 — расход газа; 14 — расход газа; 15 — расход газа; 16 — расход газа; 17 — давление и содержание кислорода в отходящих газах; 18 — давление и содержание кислорода в воздухе; 19 — печь; 20 — печь; 21 — вентилятор; 22 — конвекторный; 23 — пылевой; 24 — электродвигатель; 25 — вентилятор; 26 — решетка; 27 — вентилятор; 28 — вентилятор; 29 — фильтр; 30 — бункер сырьевых зерен; 31 — дымосос; 32 — электрический нагреватель

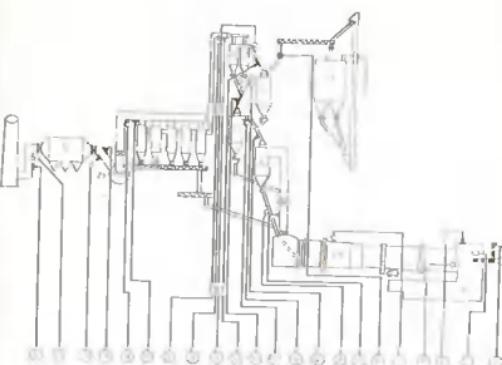


Рис. 130. Схема автоматического контроля параметров процесса в печи с циклическими теплообменниками
1 — расход газа; 2 — радиационный термометр; 3 — разрежение в горячей головке печи; 4 — температура вторичного воздуха; 5 — температура в зоне кальцинирования; 6 — расход шлама; 7 — температура перед измельчением; 8 — температура при измельчении материала на выходе во вращающуюся печь; 9 — температура измельченного материала; 10 — температура газов за измельчением; 11 — давление и содержание кислорода в отходящих газах; 12 — давление и содержание кислорода в воздухе; 13 — расход газа; 14 — расход газа; 15 — расход газа; 16 — расход газа; 17 — давление и содержание кислорода в отходящих газах; 18 — давление и содержание кислорода в воздухе; 19 — печь; 20 — печь; 21 — вентилятор; 22 — конвекторный; 23 — пылевой; 24 — электродвигатель; 25 — вентилятор; 26 — решетка; 27 — вентилятор; 28 — вентилятор; 29 — фильтр; 30 — бункер сырьевых зерен; 31 — дымосос; 32 — электрический нагреватель

Регулятор температуры зоны спекания предназначен для стабилизации качества обжига в клинкера. Датчиком является термометр, показания которого через позиционный регулятор воздействуют на изменение расхода топлива.

Регулятор избытка воздуха обеспечивает нормальное горение топлива в зоне спекания. Избыток воздуха определяют косвенно, по содержанию кислорода в отходящих газах. Поскольку для стабилизации теплового режима в печи требуется независимое изменение подачи топлива и воздуха, то содержание кислорода в отходящих газах поддерживается в определенных пределах (от 1 до 2,5%) и избыток воздуха регулируют только в случае отклонения содержания кислорода за указанные пределы.

Блок-схема автоматической стабилизации теплового режима вращающейся печи дана на рис. 128. Регуляторы должны действовать в некоторой степени взаимосвязано друг с другом. Поэтому начальные задания регуляторам задаются по данным технологических испытаний вращающейся печи, работа которой в этот период должна находиться в режиме, близком к оптимальному. При этом дол-

тире вторичного воздуха $I_{\text{вв}}$ — расход общего воздуха P_0 — число колодцев решетки; T_0 — температура клинкера; P_1 — регулятор общего расхода воздуха; P_2 — регулятор давления под решеткой; P_3 — регулятор разрежения в горячей головке печи; NM — дополнительный манометр

ны быть определены пределы регулирующих воздействий топлива и печи, а также изменения заданий регуляторам температуры отходящих газов и температуры зоны спекания.

Описанная схема автоматической стабилизации теплового режима используется для вращающейся печи с регуляторными ходоизменителями.

Для працюючої печі з колосниковим холодильником вводиться додатковий регулятор стабілізації розрізшення в горячій голонке печі з цією метою воздійства на отсікаємий воздух у холодній камері холодильника. На рис. 129 показана блок-схема автоматичного контролю та регулювання колосникового холодильника «Вільга».

Указанная схема регулирования складывается из трех систем:

I. Стабилизация общего расхода воздуха с воздействием на направляющий аппарат вентилятора общего дутья и с коррекцией по температуре неподвижного колосника.

2. Регулирование давления под колосниковкой решеткой горячей камеры хлебопечки с воздействием на число ходов решетки.
3. Стабилизация разрежения в горячей головке печи с воздействием на направляющий аппарат вентилятора аспирационной установки.

Первая система является основной и обеспечивает подачу минимального стабильного количества воздуха при различной толщине слоя клинкера на решетке и размера частиц клинкера. Стабилизация общего расхода воздуха на минимальном уровне обеспечивает постоянство температуры воздуха, поступающего в печь, и более высокое среднее значение температуры воздуха в печи.

Для вращающихся печей с циклонными теплообменниками схема автоматического контроля параметров теплотехнического режима представлена на рис. 130. Описанные элементы автоматического регулирования основных переделов цементного производства послужили основой создания в СССР первой комплексной автоматической системы управления «Цемент-1», которая успешно эксплуатируется на Себриковском цементном заводе. На базе этой системы разработана более совершенная автоматическая система управления технологическими процессами (АСТУП) обжига, приготовления сырьевой смеси помола цемента. В отечественной практике на цементных заводах эксплуатируется 16 таких систем. Новые цементные заводы проектируются как автоматизированные технологические комплексы (АТК). Дальнейшее развитие автоматизации происходит на основе применения электронно-вычислительных машин, которые осуществляют соответствующие расчеты, связи и выдачу информации. Самым последним достижением автоматизации производства цементных заводов на базе вычислительных машин является применение на этих заводах микропроцессоров. В указанных системах управление полностью цифровое, а связи с периферийным оборудованием цифровая или аналоговая. Присоединение микропроцессоров к ЭВМ осуществляется на основе цифровой техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Баренбом А. М. и др. Технические расчеты печей и сушек. Свердловск: пр-во М. 1961

2 Ермаков И. С., Жигалов Н. П. Методы определения, I-я. Физико-техническое. 1960

3 Булавин И. С., Диджев В. В. Новые методы в стекольном производстве. М. 1955. № 1

4 Булавин И. А. Технология производства стекла. М. 1950

5 Булавин И. А. Технология стекла и стеклопроизводства. М. 1952

6 А. Махаджанян. Стекло и стеклопроизводство. М. 1958

7 Валентин П. А., Гришков П. А., Китлев Е. П., Торк Ю. Ю. Углеродистые печи. М. 1961

8 Воронцова А. А. Технические характеристики и производство промышленных материалов. М. 1958

9 Воробьев Х. С., Мазуров Д. Я. Технология стекла и производство печей

аппаратов. М. 1962

10 Гаврилов С. М., Матузов В. Я., Соколов А. А. Технические процессы и аппараты стекольной промышленности. М. 1958

11 Гибсона Д. Б. Стекловарение печи. М. 1967

12 Гибсона Д. Б., Деалинсон С. Н., Ходоров С. И., Чижевский А. Ф. Печи и сушильные установки. М. 1949

13 Гибсона Д. Б., Деалинсон С. Н., Ходоров С. И. Технологические расчеты печей и сушилок. Свердловск: промиздат Свердловска. М. 1950

14 Гибсона Д. Б., Рапортер А. Я. Новый метод расчета печей изолированных. В кн. «Советское стекло и тепло». Мир и тепло. 1958 год. № 198

15 Егоров А. М., Гришков П. А. Технология производства стекла и печей. М. 1958

16 Гришков М. А. Основы общей технологии стеклопроизводства. М. 1958

17 Гришков С. К., Ефимьев В. С. Введение в химию разнотипных стекел. М. 1958.

18 Гришков С. К., Ефимьев В. С. Печь и изоляция. Народное хозяйство СССР. № 10. 1958

19 Даффи Джон. Технические процессы с использованием солнечного тепла. Народное хозяйство Юга СССР. № 10. 1958

20 Закаринская Н. А. Технология производства в стекольных печах. Киев. 1962

Форма стекла. М. 1958

21 Лариков И. Н. Стекло гидротермическое. М. 1958

22 Лаптев В. Я., Соколов В. Н. и др. Автоматизация процесса стекловарения печь-автомат. Свердловск: гидростекло. 1970. № 12

23 Мазуров Д. Я. Технология стеклопроизводства. М. 1962

24 Мазуров М. Г., Меткин Ахадзаров А. Ф., Костявин К. А. и др. Электротехника. М. 1962

25 Меткин А. Ф. Исследование конструктивного гелиогенобена в новых защелках при III-IV степенях. М. 1962. № 18

26 Михеев М. А. Основы теплотехники. М.-Д. 1949

27 Мороз И. Н. Автоматизация производств фарфорофианитовых изделий. Киев. 1962

Сортировщик по производству стекла. Т. 1 и 2. М. 1953

Степаненко Н. Г. Путешествие по заводам стекловаренных изделий. М. 1959

Прикладная кинематика. Свердловск: пол. изд. Г. Л. Рождествен. М. 1976

Трунина Т. К. Кинематика электротехнических машин и механизмов. Свердловск: Издательство научно-технической литературы. 1971. № 1

Ходоров Е. И. Конструирование производств. Народное хозяйство. № 12. 1968

Изобретательская кинематика. Свердловск: пол. изд. Г. Л. Рождествен. М. 1976

Ходоров Е. И. Конструирование производств. Свердловск: Издательство научно-технической литературы. 1971. № 1

Ходоров Е. И. Конструирование производств. Народное хозяйство. № 12. 1968