

История развития

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 вяжущих 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 наиболее распространенных печей 21

Глава III. Особенности теплообмена в печах и сушильках силикатных производств

- § 7. Канальчатый режим работы печи 27
 § 8. Радиационный режим работы печи 31

Глава IV. Движение газов и печей и сушилок по производству силикатных материалов

- § 9. Печи движущегося слоя 33
 § 10. Всплывание и внутренняя циркуляция газов 38
 § 11. Принципы обжига 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. Процессы горения топлива 47
 § 14. Устройства для сжигания топлива 50
 § 15. Выбор топлива и методы его сжигания 56

Глава VI. Процесс сушки и сушилки в технологическом силикатных материалов

- § 16. Сушилки для сырьевых материалов 60
 § 17. Сушилки в производстве керамических изделий 63

Глава VII. Печи для обжига керамических изделий

- § 18. Печи периодического действия 65
 § 19. Печи непрерывного действия 69

Глава VIII. Печи для производства стекла

- § 20. Классификация стекловаренных печей 132
 § 21. Горючие печи 134
 § 22. Ванные печи 139
 § 23. Электрические и электро-электрические печи 175
 § 24. Вспомогательные печи 182
 § 25. Тепловой режим 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 сырьевой смеси 199
 § 28. Вращающиеся печи для производства цементного клинкера 203
 § 29. Материальный и тепловой балансы цементобжигающей печи 233
 § 30. Определение теплового и технологического коэффициентов полезного действия 238
 § 31. Определение тепловой мощности печи 238
 § 32. Пылеулавливающие устройства 240
 § 33. Нахальные печи 241
 § 34. Автоматизация процесса обжига клинкера 242
 Список литературы 247
 Предметный указатель 248

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 силикатов».



МОСКВА СТРОЙИЗДАТ 1982

§ 1. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

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, аэродинамики печных газов, организации теплопередачи и утилизации тепловой энергии в единую систему, характеризующую работу и конструкцию тепловых установок. Качество выпускаемой продукции и рентабельность различных силикатных производств во многом определяются работоспособностью тепловых установок и зависят от правильности выбора конструкции, осуществленных в них, и от правильности смеси или сформованных из керамической массы изделий по специально разработанным режимам протекания взаимовлияния отдельных кристаллических фаз и расплавов. В результате таких процессов из механической смеси исходных материалов получают либо однородный расплав (стекломассу) для формирования изделий, либо спекшийся цементный клинкер, либо керамические изделия.

При нагревании сырьевой смеси или сформованных из керамической массы изделий по специально разработанным режимам протекания взаимовлияния отдельных кристаллических фаз и расплавов. В результате таких процессов из механической смеси исходных материалов получают либо однородный расплав (стекломассу) для формирования 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°С) в печах различной конструкции. Печи проектируют в соответствии с особенностями протекающих в них процессов и требованиями, предъявляемыми к выпускаемой продукции.

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

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

Для производства стекла важны освобождение стекломассы от газовых включений и ее гомогенизация. При большой вязкости длительных тепловых процессах протекают медленно и требуют для своего завершения длительных выдержек, чем и объясняются большие размеры бассейнов выварочных печей.

Керамические изделия при обжиге сжимаются в размерах, дают «усадку» и при неравномерном нагреве деформируются или растрескиваются. Если учесть, что размеры изделий кислотоупорной и электроизоляционной керамики, что размеры изделий в форме достигают 2 м и более, то станет понятным сложность проектирования и эксплуатации керамических тугоплавких печей длиной до 160 м, применяющихся на современных заводах. Отмеченные при типа печей преобладают на современных заводах, так как являются наиболее производительными и надежными в эксплуатации.

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 формирования примитивными 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 сжигали в примитивных топках при обжиге керамических изделий. Обнаруженные в Египте следы производства изделий из стекла за 1600 лет до н. э. указывают на использование (ввиду низкой температуры сжигания топлива в кострах) двухстадийного способа варки стекла в глиняных скорородах, прототипах горшков в современных печах периодического действия.

Археологическими раскопками также подтверждено, что глиняные скоророды диаметром до 250 мм и высотой до 130 мм устанавливали на глиняные подставки в центре печи, приспособленной для сжигания сухих дров. Предполагается, что на первой стадии из шихты известково-натриевого стекла с высоким содержанием щелочей, низким содержанием окиси алюминия Al_2O_3 получали фритту из легкоплавких силикатов. На второй стадии в результате удаления из дробленой фритты кусков с остатками неповаренного и дешевого 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 прямоугольной печи (3 × 5 м) с двумя отделениями (Теодил, 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 (Агрикол, XVI в.). В первом этаже размещена топка с вылетом пламени в центре пода второго этажа, вокруг которого расположены шесть горшков. В стенах топки имеются окна для загрузки горшков и выработки стекла. Тиглы 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 горшков вместимостью 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 кг стекломассы, а на ее выработку — 2—3 кг кг.

В конце поздних конструкций горшковые печи для повышения температуры варки стекла и снижения расхода твердого топлива использовали подгазовые топки. В этот же период появляются горшковые печи, работающие на жидком топливе, природном и генераторном газе.

Быстрое распространение печей, работающих на генераторном газе, связано 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. Применявшиеся в это время в некоторых печах регенераторы из стальных и чугунных труб быстро окислялись при подогреве воздуха выше 400 °С и не могли конкурировать с регенераторами.

Горшковые печи с регенераторами работают с нижним или верхним пламенем. В печах с нижним пламенем сжигание нагретого в регенераторе газа с использованием горячего воздуха начинается в каналах (кадках), заложённых под полом печи, и заканчивается в круглой печной камере. В этой камере печные газы омывают установленные на полу горшки, удаляются через каналы в регенераторы и затем в атмосферу. В печах с нижним пламенем быстро изнашиваются горшки и под кадей, поэтому их применяют при невысокой температуре варки стекла. Для варки тугоплавких стекол применяют горшковые печи с верхним пламенем и расположением влетов горшковых печей. В России 12- и 16-горшковые 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 горшковые печи, предназначенные для производства разнообразного стекла, заменили ваннами регенеративными печами непрерывного действия с поперечным и подковообразным движением пламени.

Дальнейшее усовершенствование ванн 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 электроплавильных коррозионно-стойких огнеупоров, высококалорийного жидкого топлива и природного газа.

Разработка конструкций высокопроизводительных автоматов для формирования листового стекла разного назначения, посуды, стеклянной тары, разнообразных изделий для машиностроения и других отраслей народного хозяйства обусловила резкое увеличение производительности ванн печей. Позиция, 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 ванн печах обеспечивают форму и направление факела пламени, способствуют интенсификации теплового обмена газов с поверхностью стекломассы.

В настоящее время подавляющая часть стеклянных изделий формируется из стекла, сваренного в ванн печах.

Ванн 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 электронатрева, применение механических перемешивающих 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 ванн стекловаренных печей.

§ 2. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

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

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

ливалась полусезонная работа заводов того времени. Зимой проводили лишь обжиг изготовленных летом кирпичей, которые разбивали на куски и вручную загружали вместе с мелким углем или коксом в шахтную печь периодического действия.

Приготовление сырьевой смеси, обслуживание складной естественной сушки, загрузку и разгрузку шахтных печей выполняли вручную в тяжелых и вредных для здоровья условиях. В конце XIX в. в связи с увеличением потребности в цементе начался переход Глухозерского завода на круглогодичную 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, но все еще сохранились 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 сжигания топлива в слое материала и тепла продуктов его сжигания на подогрев материала, поступающего в зону обжига, обеспечивает высокий тепловой к. п. д. этих печей. Поэтому усовершенствованные шахтные печи широко используют для обжига извести, а также шашота, 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 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 конструкции 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 Волске, а 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 СССР 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

Показатели	Данные по годам			
	1928	1930	1958	1978
Число вращающихся печей	55	123	213	388
Суммарный выпуск вращающихся печей, % к общему общему выпуску цемента	34	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

Печи 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 шлама, кусковых и сыпучих материалов (преимущественно в производстве вяжущих материалов), керамических изделий и для варки стекла разного назначения.

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

Типичные тепловые установки, применяемые в технологии силикатных материалов, различают по следующим основным характеристикам: по типу работы — периодическому или непрерывному, форме канала или камеры, в которых протекают физико-химические и тепловые процессы, циркуляции газов и условиям теплообмена 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. До мере повышения температуры плавится или керамическая 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 вяжущие 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 сушилках. При мокром способе производства цемента около 35% воды удаляется из шлама (сырьевой смеси) во вращающемся пече с большим расходом теплоты. Удаление воды из шликера (жидкой керамической массы) для получения прессовочного порошка осуществляется при производстве плиток в распылительных сушилках 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 сушилках используют 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 каолиновых 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 отечественных компонентов исходного сырья и нагревание выделяющихся при этом углекислого газа и паров воды требуют значительных затрат тепла; особенно больших затрат требует производство цемента, где известняк и глина — основное сырье.

Основные процессы варки стекла — разложение соды, известняка и других компонентов шихты, образование силикатов и расплавов, легация и гомогенизация стекломассы — протекают без четкого разграничения во времени. Шихта, используемая для варки стекла, обычно отличается высоким содержанием щелочей, которые вступают в реакции 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 определения тепловых коэффициентов 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
Скрытая теплота сжатия компонентов шихты	250
Реакция стеклобразования	460
Нагрев газообразных продуктов дегидратации стекломассы	520
Нагрев стекломассы от 20 до 1400° С	1350
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 (теоретический 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) сформованных из них изделий. Тепловой эффект обжига грубой строительной керамики, огнеупоров, технической и строительной керамики рассчитывают в зависимости от фазового их состава.

По протекающим физико-химическим процессам обжиг разделяют на два периода. В первом периоде в интервале температур 20—900° С удаляется физически связанная вода 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 возникает высокая механическая прочность, огнеупорность 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 твердых фазах выполняется при использовании химически чистых исходных материалов, преимущественно в одноконтинентных или двухкомпонентных системах, когда при конечных температурах обжига не возникают эвтектические расплавы. Этот процесс отличается высокой стоимостью исходных материалов, высокими температурами обжига, дорогим и малопроизводительным оборудованием. Поэтому спекание в твердых фазах применяют при специальных требованиях к изготавливаемым изделиям.

Спекание с участием жидкой фазы протекает при взаимодействии кристаллических фаз с тонкодисперсным и равномерно распределенным легкоплавким минеральным или синтезированным плавнем («спеком»). Образовавшийся из жидкой фазы снижает температуру и продолжительность спекания кристаллических фаз в монокристаллический материал. Спекание с участием жидкой фазы — основной тепловой процесс в производстве строительной керамики, изоляционного и хозяйственного фарфора и других изделий. Содержание стекловидной фазы в изделиях, обжигаемых с участием жидкой фазы составляет от нескольких процентов до 30—40%.

Третий тип спекания протекает с образованием на первой стадии обжига эвтектик на стенках 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, требований к обожженным изделиям и разработанному режиму обжига в нем могут преобладать элементы спекания второго или третьего типа, обеспечивающие минимальный удельный расход теплоты, небольшую продолжительность цикла теплообработки 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 разделяют на печи для обжига при температурах выше 500°С, при таких температурах протекают сложные процессы получения разнообразной силикатной продукции, и на сушилки, работающие при низких температурах для удаления влаги, физически связанной с твердыми компонентами шихты, 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 шихты, магнезита, доломита, глинозема в производстве огнеупоров.

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

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

Каждая из трех групп печей отличается особенностями протекающих в них физико-химических процессов и требованиями, предъявляемыми к тепловой обработке шихты 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 многотоннажных производствах печи периодического действия.

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

Вращающиеся печи, применяемые для обжига цементного клинкера, шихты, магнезита, керамзита, извести, гипса и тому подобных материалов, отличаются наименьшей производительностью, минимальными затратами рабочей силы на обслуживание при относительно высокой стоимости и металлоемкости 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 шихты 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 известки, а также сырья в производстве огнеупорных изделий обычно работают без теплообменных устройств.

Шахтные печи применяют для обжига известки, шамота, магнетита 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 капиталовложениями на их содержание. Шахтные печи по сравнению с вращающимися печами имеют существенные недостатки: невысокую производительность, неравномерный обжиг по сечению шахты, большой удельный расход рабочей силы.

Печи для обжига материалов в кипящем слое или во взвешенном состоянии начинают применять для обжига известки, 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 известняка 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 (шптрота).

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

Распространение получили непрерывно действующие печи и печи периодического действия.

К непрерывно действующим печам относят ваннны 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 формирования 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 эмалей, глазури и флюсов. Такие печи отличаются от вращающихся печей цементной промышленности небольшой длиной и более низкой производительностью.

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

горшковые печи предназначены 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 глазури 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). Особенности 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, кольцевые 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, а сечение — от 0,04 до 6 м². По способу нагрева туннельные печи могут быть разделены на печи с непосредственным (прямым) нагревом изделий печными 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 производства изделий различного назначения, удобством обслуживания, долговечностью и надежностью в эксплуатации.

Муфельные туннельные печи применяют для обжига санитарной керамики, облицовочных плиток, майолики и других изделий, покрытых цветными глазуриями, а также для закрепления керам-

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 постелища.

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

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

Конвейерные печи с сетчатыми, роликовыми и ленточными 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 следствие, с большой, обычно односторонней загрузкой в целевых 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 печах сокращения теплопотерь и лучшего использования площади печного дна конвейерные печи объединяют по несколько каналов в одном блоке. Существенная экономия энергии при электрообжиге в многоканальных печах достигается применением встречных потоков полуфабрикатов.

Кольцевые печи с периодичной загрузкой и перемещающимися в замкнутом кольце источниками подогрева, обжига и охлаждения применяют для обжига строительного кирпича, пустотелых блоков и черепицы на твердом топливе.

Топливо загружается через отверстия в своде и сторае в садке кирпича. Кольцевые печи отличаются малой металлоемкостью и невысокими капитальными затратами, работают с высоким тепловым коэффициентом полезного действия.

Загрузка и разгрузка кольцевых печей выполняется вручную в душной выветренной атмосфере. В настоящее время кольцевые печи заменяют туннельными, если используемое сырье обеспечивает устойчивость садки кирпича на заготовках в зоне обжига.

Многокамерные печи состоят из блокированных газодохлами камер, работают на газообразном или жидком топливе и применяют для обжига огнеупоров и кислотопоров. От печей периодического действия многокамерные отличаются использованием газов, уходящих 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 ленточные 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 кислотопоров по специальным для отдельных камер режимам.

Неустойчивая садка на вагонетках туннельных печей таких изделий, как канализационные и кислотопорные трубы малых диаметров, вынуждает использовать в этих условиях многокамерные печи с неподвижной садкой.

К печами 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 глиняного кирпича с использованием механизированного транспорта для загрузки и выгрузки штабеля с большим объемом садки.

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

Высокотемпературные электронагреватели с вольфрамовыми и молибденовыми нагревателями 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 дисилицидмолибдена и используются в основном для проведения научно-исследовательских работ.

1. 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 технологиях для сушки известняков, угля, глины, опилок и других кусковых и сыпучих материалов.

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

§ 6. СХЕМЫ УСТРОЙСТВА И РАБОТЫ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ПЕЧЕЙ

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

Распылительные сушилки используют 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 электроэнергии непосредственно к высушиваемому изделию и применяются для сушки крупногабаритных огнеупорных изделий.

Высокочастотные сушилки представляют собой камеру, размещенную в поле индуктора. Высушиваемые изделия, помещенные в камеру, 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 осуществляется, 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, полочных 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 электронагревателями.

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 многообразное их применение в разных производствах вяжущих материалов, стекла, огнеупоров, бытовой и технической керамики. Поэтому в дальнейшем изложении будут рассматриваться наиболее распространенные печи и сушилки в тех конструктивных вариантах, которые получили преимущественное применение в том или ином производстве.

В производстве вяжущих 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 (фальш-подогреватели, ценная запаса и т. д.).

Печи, работающие по сухому способу производства (короткие печи), отличаются небольшой длиной (до 75 м) и комбинируются с внешними теплообменными устройствами — циклонными, 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 промежуток между кусками обжигаемого материала и используется для дожигания продуктов неполного сгорания топлива и нагрева обжигаемого материала.

Печи для обжига в кипящем слое состоят из шахты, разделенной огнеупорными решетками 6 (рис. 1, в) на камеры подогрева 1, обжига 2 и охлаждения 3. Камеры соединены переносными 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 ищей перед шпактными в более равномерном обжиге вследствие перемешивания кусков материала в кипящем слое.

В производстве керамических и делтий наиболее распространены получили туннельные, конвейерные, кольцевые, многокамерные печи непрерывного действия и камерные печи периодического действия.

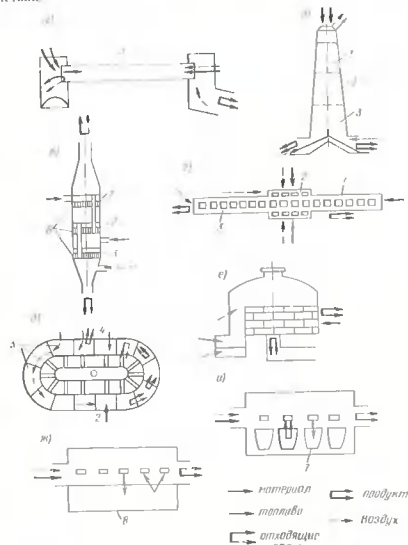


Рис. 1. Схемы основных печей силикатной технологии

Вместе с тем в литературе по данному вопросу отсутствуют исследования о влиянии на формирование личности ребенка различных факторов окружающей среды.

Туннельные печи имеют обычно прямой песчаный канал (рис. 1, а), через который на вагонетках подуют 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 зоны охлаждения используется в зонах подогрева и обжига и в сушилках формовочных цехов.

Конвейерные печи, как и туннельные, имеют канат, через который изделия перемещаются специальными жароупорными рошками, денточными или подочными конвейерами. В юге обжига печи оборудуют газовыми и реже мазутными топками и ши электронагревательными элементами, расположенными выше и ниже конвейера.

Точечные газы из зоны обжига проходят через шину подопира и обжигают изделия, подаваемые вальцовым конвейером. В зоне охлаждения изделия охлаждаются встречным потоком холодного воздуха. В конвейерных печах инерсестивного нагрева и охлаждения организованы интенсивный теплообмен по схеме противотока. В муфельных печах изделия нагреваются в основном излучением от огнеупорных перегородок, отделяющих их от топочных газов.

Кольцевые печи отличаются от туннельных замкнутой системой канатов (рис. 1, д), в которых процессы поджарки, обжарки и охлаждения перемещаются по направлению движения печных газов через неподвижную садку строительного кирпича, бляшек и изделий. Кроме трех зон теплообработки в этих печах имеется также перемещающаяся зона загрузки сырья и разгрузки 4 обожженного кирпича.

В зоне обжига имеет значение твердое топливо (прежде всего) подается через каналы в своде печи непосредственно в промежуток, оставшиеся в садке из-за падения для сжигания топлива. Горячий воздух, необходимый для процесса горения, поступает из зоны охлаждения. Газы из зоны обжига проходят через зоны поджога и через бороз удаляются в атмосферу. Печной канал не имеет перегородок и водонепроницаем из камеры проемами в наружной стене, через которые пропускается и разгружается печь. Кочегарные печи могут работать в пропущенной грубой строительной кирпичной, обжигаемой обычно при температуре 1000–1100 °С с малым удельным расходом твердого топлива (обычно износостойкого) но из-за высокой трудоемкости процессов загрузки и выгрузки из-за высокой температуры при соприкосновении с предосторожностями тушевыми печами.

Мушкетерские газопечи, как и котельные, растут и используются в тех же точных газ и горячий воздух в смежных камерах, обособленных промежуточными стенками с каналами в точных устройствах. Мушкетерские печи отличаются от котельных более равномерным обжигом и поэтому могут использоваться для обжига небольших партий огнеупоров и кислотоупоров по частоте обжига.

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, топочные газы поднимаются под свод камеры, а затем проходят нисходящим потоком через каналы между изделиями и удаляются через отверстия под 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° С применяют круглые двухэтажные печи «горны», в которых газы после обжига изделий в нижней камере подаются по каналам в стенах в верхнюю камеру для предварительного (утельного) обжига изделий при температуре 800—900° С. Двухкратное использование печных газов в этих печах дает существенную экономию топлива. Перевод этих печей с твердого топлива на мазут позволяет улучшить регулирование режима обжига и условия обслуживания печи. Тяжелые условия загрузки и разгрузки печных камер и затруднения, возникающие при переводе производства на непрерывные поточные методы работы, привели к замене периодических печей туннельными. В настоящее время периодические печи применяют в производстве изделий разнообразного ассортимента по часто меняющимся режимам обжига, например, крупногабаритных электроизоляторов и кислотоупорных изделий.

В производстве стекла наибольшее распространение получили горшковые печи непрерывного и периодического действия, а также горшковые 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 8, разделенный на варочную и выработочную части. В варочной части бассейна производится варка стекломассы заданного состава, ее осветление и гомогенизация. В выработочной части бассейна за счет снижения температуры стекломасса приобретает оптимальную для данного состава стекла формовочную вязкость. Варка стекла и ее осветление происходят за счет передачи теплоты от продуктов сжигания топлива. Температуру стекломассы в выработочной части бассейна регулируют разными способами.

Для использования теплоты выходящих из печи топочных газов их поддают в регенераторы или рекуператоры для предварительного нагрева воздуха и газа. Нагрев газа и воздуха способствует повышению температуры горения газовой 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.

Горшковые печи состоят из камеры (рис. 1, и), в которой установлены огнеупорные горшки 7 для варки стекла. Загрузку шихты в горшки и замену изолированных 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 горелок и выходом пламени через каналы в полу печи. Для подогрева воздуха и газа используют регенераторы или рекуператоры.

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

Ванные печи периодического действия, как и горшковые, работают по циклу: загрузка шихты, варка, осветление 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 газурной фритты 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 формирования изделий в автоматические линии. Основные элементы этих печей: прямой канал с роликовым или ленточным конвейером из жароупорной гетки, 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 СИЛКАТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Тепловая обработка материалов в печах и сушилках силикатной технологии осуществляется в результате теплообменных процессов. Причем процессы взаимодействия между теплоносителем (плазмой, горячими газами или воздухом, или источником лучистой энергии и поверхностью нагрева) в своей совокупности составляют внешний теплообмен, а теплопередача внутри 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 слоевой режимы внешнего теплообмена.

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

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:

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

где α — коэффициент внешней теплоотдачи; 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 нагреваемого тела; C, t — температура тела, °C; τ — время, ч.

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

$$\frac{\Delta t_{\text{вн}}}{\Delta t_{\text{ст}}} = f(Bi) \quad (2)$$

где $\Delta t_{\text{вн}}$ — разность температур между поверхностью и серединой нагреваемого тела, °C; $Bi = \alpha \lambda_0 / \lambda$ — критерий Био; λ_0 — толщина тела в направлении теплового потока от поверхности до середины, ч.

При малых значениях критерия Био ($Bi < 0,25$) тело нагревается равномерно по толщине и внутренняя теплопередача не учитывается при расчете нагревания. Такие тела предложено называть тонкими.

При больших значениях Bi ($Bi > 0,5$) перенос температуры внутри тела при его нагревании может быть значительным, и такие тела принято называть массивными.

Процесс нагревания тонких тел учитывается условиями внешнего теплообмена, процесс нагревания массивных тел — внутренним теплообменом. При плавлении массивных тел интенсификация внешнего теплообмена ведет к ускорению процесса плавления и, следовательно, к уменьшению толщины и степени массивности. Поэтому процесс плавления димитируется 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 составляющей носит подчиненный характер.

Интенсификация теплопередачи конвекцией осуществляется либо в результате внешних воздействий (барботажа), либо путем нагревания, вызывающего естественную конвекцию. Нагрев жидких тел 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, то точки зрения интенсификации внешней теплопередачи, то при нагреве массивных тел увеличение F/G и связанное с ним уменьшение прогреваемой толщины играет главную роль, а точки зрения интенсификации внутреннего теплообмена, вызывая уменьшение стенок массивности.

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

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

§ 2. КОНВЕКТИВНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПЕЧИ

Конвективный режим работы тепловых установок характеризуется преобладающим значением теплоотдачи конвекцией.

Область применения конвективного режима весьма обширна. В основном этот режим как самостоятельный применяют в сушилках силикатной технологии, работающих при температуре не выше 100—300 °C, в зонах подогрева и охлаждения туннельных печей для обжига керамики, в конвективных зонах и холодильниках иращающихся 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 °C, если тепловые скорости движения теплоносителя конвекции и теплопередача может иметь заметное влияние на процесс теплообмена и при более высоких температурах.

Теплопередача конвекцией может быть выражена известной формулой Ньютона

$$Q = \alpha_0 (t_{\text{г}} - t_{\text{с}}) F_{\text{с}} \quad (3)$$

где $t_{\text{г}}$ — температура газа, устанавливаемая на основании принятого способа определения; $t_{\text{с}}$ — температура поверхности нагрева; $F_{\text{с}}$ — площадь поверхности нагрева, м²; α_0 — коэффициент теплоотдачи конвекцией. Вл (м²·°C)

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 смываемой им поверхности

$$\alpha = f(\omega; \epsilon; \lambda; C_r; \rho; \mu; \Phi; \epsilon; b) \quad (4)$$

где ω ; C_r ; ρ ; μ — соответственно скорость, теплоемкость, плотность и абсолютная вязкость газа; Φ — характеристика формы поверхности нагрева; ϵ ; 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:

$$Nu = f_1(Gr; Pr) \quad (5)$$

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

$Gr = \frac{g \beta \Delta t b^3}{\nu^2}$ — критерий Грасгофа;

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

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

Условия вынужденной конвекции характеризуются уравнением

$$Nu = f_2(Re; Pr) \quad (6)$$

где $Re = \frac{\omega b}{\nu}$ — критерий Рейнольдса.

Из этого уравнения [5] следует, что в случае свободной конвекции интенсивность теплоотдачи определяют значениями критерия Gr , т. е. двумя главными параметрами Δt 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 существования	Значение критерия															
Плоскость 	$Gr \cdot Pr < 10^9$ Ламинарное течение $Gr \cdot Pr > 10^9$ Турбулентное течение	$Nu = 1,8 \sqrt[4]{\frac{Pr \cdot Gr}{2,3 \cdot Pr + 0,5}}$ $Nu = 0,65 \sqrt[4]{\frac{Pr^2}{(1+Pr)} \cdot Gr^{0,25}}$ $Nu = 0,129 (Gr \cdot Pr)^{0,43}$															
Цилиндр 	$Gr \cdot Pr < 10^9$ Ламинарное течение $\frac{b}{d} \leq 1$ $Gr \cdot Pr > 10^9$ Турбулентное течение	То же, что и для плоскости															
Плоскость 	$Gr \cdot Pr < 10^9$ $Pr = 0,7$	$Nu = C_1 \sqrt[4]{\frac{Gr \cdot Pr}{C_2}}$ <table><tr><th>$Gr \cdot Pr$</th><th>C_1</th><th>C_2</th></tr><tr><td>$1 \cdot 10^3$</td><td>0,59</td><td>0,49</td></tr><tr><td>$5 \cdot 10^3$</td><td>0,54</td><td>0,46</td></tr><tr><td>10^4</td><td>0,52</td><td>0,45</td></tr><tr><td>$5 \cdot 10^4$</td><td>0,49</td><td>0,43</td></tr></table>	$Gr \cdot Pr$	C_1	C_2	$1 \cdot 10^3$	0,59	0,49	$5 \cdot 10^3$	0,54	0,46	10^4	0,52	0,45	$5 \cdot 10^4$	0,49	0,43
$Gr \cdot Pr$	C_1	C_2															
$1 \cdot 10^3$	0,59	0,49															
$5 \cdot 10^3$	0,54	0,46															
10^4	0,52	0,45															
$5 \cdot 10^4$	0,49	0,43															
Цилиндр 	$Gr \cdot Pr < 10^9$	$Nu = 0,36 \sqrt[4]{\frac{Gr \cdot Pr}{C_2}}$ <table><tr><th>$Gr \cdot Pr$</th><th>C_2</th></tr><tr><td>$1 \cdot 10^3$</td><td>0,49</td></tr><tr><td>$5 \cdot 10^3$</td><td>0,46</td></tr><tr><td>10^4</td><td>0,45</td></tr><tr><td>$5 \cdot 10^4$</td><td>0,43</td></tr></table>	$Gr \cdot Pr$	C_2	$1 \cdot 10^3$	0,49	$5 \cdot 10^3$	0,46	10^4	0,45	$5 \cdot 10^4$	0,43					
$Gr \cdot Pr$	C_2																
$1 \cdot 10^3$	0,49																
$5 \cdot 10^3$	0,46																
10^4	0,45																
$5 \cdot 10^4$	0,43																
Шар 	$Gr \cdot Pr < 10^9$	То же, что и для цилиндра															

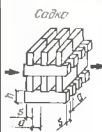
Рис. 2. Значения критерия Нуссельта в условиях свободной конвекции для различных геометрических форм

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

§ 8. РАДИАЦИОННЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ПЕЧИ

Радиационный режим работы печей предполагает осуществление внешнего теплообмена в основном посредством лучеиспускания.

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

Форма тела	Власть существо- вания	Значения критерия						
<p>Сетка</p> 	$20 < Re < 4000$	$Nu = C \left(\frac{a}{\delta} \right)^{0.45} \left(\frac{\delta}{H} \right)^{0.53} Re^n$ Поперечное направление						
		<table><tr><th>C</th><th>n</th></tr><tr><td>$20 < Re < 400$</td><td>0,5</td></tr><tr><td>$400 < Re < 4000$</td><td>0,32</td></tr></table>	C	n	$20 < Re < 400$	0,5	$400 < Re < 4000$	0,32
		C	n					
		$20 < Re < 400$	0,5					
$400 < Re < 4000$	0,32							
Продольное направление								
<table><tr><th>C</th><th>n</th></tr><tr><td>$20 < Re < 400$</td><td>0,5</td></tr><tr><td>$400 < Re < 4000$</td><td>0,7</td></tr></table>	C	n	$20 < Re < 400$	0,5	$400 < Re < 4000$	0,7		
C	n							
$20 < Re < 400$	0,5							
$400 < Re < 4000$	0,7							

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

С другой стороны, теплота, получаемая поверхностью нагреваемого материала, зависит от степени черноты пламени ϵ_p и достигает максимума при $\epsilon_p = 1$.

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

$$C_p^{MK} = C_{ch} \epsilon_p T_{pl} \quad (7)$$

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

Суммарное облучение того или иного элемента поверхности нагрева, следовательно, складывается из 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 целях 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 температуры 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 теплопередачи.

Направленный радиационный теплообмен создается в печи, если падающий лучистый поток от пламени на материал больше, чем на кладку, т. е. $Q_p^N > Q_k^N$. Сущность рассматриваемого теплообмена заключается в получении возможно большего значения разности $Q_p^N - Q_k^N = \Delta Q_p^{NK}$ за счет создания градиента температур по толщине пламени. В результате поверхность, прилегающая к зоне высоких температур, получает больше 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 и 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 теплопередачи при прямом теплообмене является повышение максимальной температуры пламени. В этом случае результирующий 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 приближенного расчета направленного радиационного теплообмена:

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

б) определение результирующих тепловых потоков для поверхности нагрева q_p на основании расчетов внутренней теплопередачи, $КДж м^2$.

Для выяснения необходимой характеристики отдельных зон пламени следует воспользоваться уравнением

$$q_m = \frac{\epsilon_m F_m 4,9 \cdot 10^{-8}}{(1 - \epsilon_m \epsilon_{m2} \epsilon_{m3}) (1 - \epsilon_m \epsilon_{m4})} [(q_{m1} - q_{m2} \epsilon_{m1}) Q_{1m} + (q_{m2} + q_{m3} \epsilon_{m2}) Q_{2m} + \dots + (q_{mn} - q_{m1} \epsilon_{m1}) Q_{nm}] - q_{m4} \epsilon_m \quad (8)$$

В индексах 1, 2, ..., n — обозначены зоны пламени, ϵ — угловые коэффициенты.

$$q_{m4} = \frac{q_{m1}}{1 - \epsilon_{m1}}, \quad q_{m2} = \frac{q_{m1}}{1 - \epsilon_{m2}}, \quad q_{m3} = \frac{q_{m1}}{1 - \epsilon_{m3}}, \quad q_{m4} = \frac{q_{m1}}{1 - \epsilon_{m4}}, \quad Q_{1m} = T_1^4 - T_m^4, \quad Q_{2m} = T_2^4 - T_m^4, \quad Q_{nm} = T_n^4 - T_m^4, \quad \epsilon$$

Если пламя разложено на n зон, то в вышеприведенном уравнении будут n неизвестных, а именно T_1, T_2, \dots, T_n .

Задавая результирующими тепловыми потоками для соответствующих зон и записав для этих потоков вышеприведенное уравнение, можно найти неизвестные температуры. При этом необходимо помнить, что алгебраическая сумма результирующих тепловых потоков для всех зон, включая и граничные, должна быть равна нулю, т. е. $q_{m1} - q_{m2} - q_{m3} - q_{m4} - q_{m5} - q_{m6} = 0$.

Направленный косвенный теплообмен. Такой теплообмен создается в печи при условии, если падающий тепловой поток от кладки на кладку печи больше теплового потока, падающего на поверхность нагрева, т. е. $Q_{n1} < Q_{n2}$.

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_{n1} , тем ближе температура кладки к температуре пламени и тем больше радиация кладки. Интенсивность теплового потока от пламени на кладку зависит от степени черноты пламени и его толщины.

В печах рассматриваемый теплообмен в чистом исполнении встречается редко в связи с высокой температурой обжига материалов и необходимостью поддержания температуры кладки и области предельных температур службы кладки.

Однако большее распространение в основном в производстве керамических изделий получил несколько иной способ разогрева и сушки поверхности за счет поверхностного сжигания топлива. В этом случае смесь горючего с воздухом в виде очень тонкого слоя направляется на нагретую керамическую поверхность.

Характерной стороной поверхностного горения является быстрое теплообмена между тонким слоем горючего газа и керамической поверхностью.

С точки зрения процессов теплообмена при поверхностном сжигании топлива следует выделить в печах две зоны. Первая представляет собой зону теплообмена между керамической поверхностью,

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 лучепоглощающей среды. Чем меньше 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

$$T = \frac{1}{0,5 [T_n^4 (1 - \epsilon) + T_g^4 (1 - \beta(H - x))]}, \quad (9)$$

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

Суммарный коэффициент теплопередачи в этом случае равен:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_m} + \frac{F_m}{F_n} \left(\frac{1}{\epsilon_n} + \frac{1}{\epsilon_g} \right)}, \quad (10)$$

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

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

$$q_{m1} = q_{m2} - q_{m3}$$

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, являющихся теплоносителями. Управление процессом движения газов в тепловых агрегатах дает возможность ретраивать процесс передачи теплоты, добываясь 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 установок

$$P_{\text{геом}} = H(\gamma_{\text{г}} - \gamma_{\text{в}}), \quad (11)$$

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

Геометрический напор столба газа с удельным весом $\gamma_{\text{г}}$ выражается уравнением

$$H_{\text{геом}} = P_{\text{геом}} / \gamma_{\text{г}}. \quad (12)$$

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 атмосферы, то газ обладает статическим напором

$$H_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} / \gamma_{\text{г}}, \quad (13)$$

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

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

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

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

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

$$H_{\text{геом1}} + H_{\text{ст1}} + H_{\text{дин1}} = H_{\text{геом2}} + H_{\text{ст2}} + H_{\text{дин2}} = \text{const} \quad (15)$$

Если имеет место установившееся 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 струи.

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 $h_{\text{м}}$, сопротивления от трения $h_{\text{тр}}$ и сопротивления, связанные с преодолением геометрического напора $h_{\text{г}}$, который может как препятствовать, так и способствовать движению газа.

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

$$h_{\text{м}} = a \frac{w^2}{2g} \gamma, \quad (17)$$

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

$$h_{\text{тр}} = b \frac{w^2 l \gamma}{2gd_1}, \quad (18)$$

где w — действительная скорость движения газов, м/с; l — длина канала, м; γ — ускорение силы тяжести, м/с²; d_1 — эквивалентный диаметр канала, м; b — коэффициент трения.

Для ламинарного движения $b = 64 \text{ Re}$.

Для турбулентного движения b можно принять, равной для ламинарных каналов 0,05, для металлических труб обшитых 0,035–0,04.

§ 10. ВНЕШНЯЯ И ВНУТРЕННЯЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ ГАЗОВ

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

Внешняя циркуляция газов, или рециркуляция, происходит вследствие принудительного движения газов. При рециркуляции в рабочую камеру тепловых установок подается газ, отбираемый и смешиваемый с другими газами вне камеры, чтобы создать равномерное температурное поле заданного уровня и обеспечить полное использование теплоты, полученной от сжигания топлива.

Отработанные газы из рабочей камеры целесообразно отводить в нижней части печи, так как в этом случае отводит наиболее полезными газы. При отводе газов через свод или в верхней части менее использованными. Кроме того, нижняя часть печи может оказаться не заполненной пламенем. Газы необходимо подводить на уровне отвода, так как в этом случае в значительной мере выравнивается температура по высоте камеры.

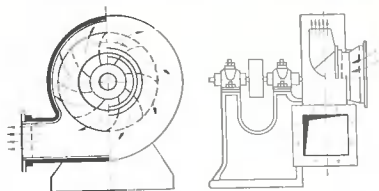


Рис. 4 Центробежный вентилятор

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

§ 11. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГАЗОВ

Газы поступают в печь как результат естественной тяги или с помощью искусственно отсасывающих и нагнетающих приспособлений. Отходящие газы отводят также с помощью естественной тяги (дымовая труба) или принудительно (вентиляторы, эжекторы). Часто в печах используют и естественную тягу, принудительный подпор и отвод газов. Напор, 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 100 Н/м² и выше. Различают вентиляторы низкого давления (до 1000 Н/м²), среднего (1000–3000 Н/м²) и высокого (выше 3000 Н/м²).

По принципу действия вентиляторы могут быть осевыми и центробежными.

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

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, выражающим связь между основными параметрами работы вентилятора. Полная характеристика вентилятора при его постоянной частоте вращения выражает зависимость между его производи-

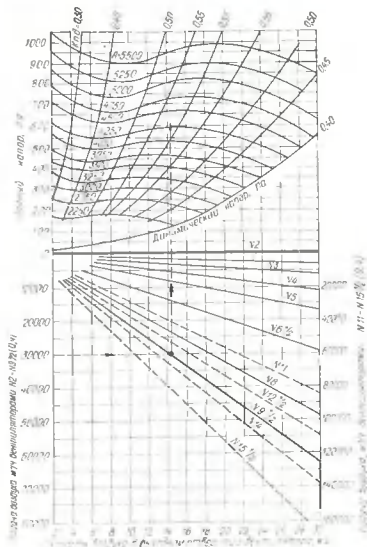


Рис. 5. Номограмма для выбора вентиляторов низкого давления

ностью 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.

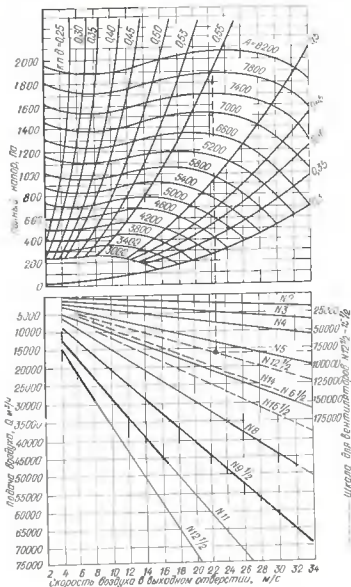


Рис 6 Номограмма для подбора вентиляторов среднего давления

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 вверх, обозначают коэффициент полезного действия вентилятора при различной его производительности.

Крайняя кривая 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 теплосиловых 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 тонок 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 А. Органическую массу топлива составляют углерод, водород, кислород и сера.

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

Органическая масса топлива дает представление о топливе без примесей золы, серы и влаги и помогает выяснить характер его происхождения.

Условно горючая масса характеризует горючую часть топлива. Состав сухого топлива, высушенного до его постоянной массы, является характеристикой топлива.

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

Для обозначения состава, к которому относится содержание того или иного элемента в топливе, применяют индексы о, г, с и р. Например: С — обозначают содержание углерода в органической массе; S — серы в условно горючей массе; Ас — золы в сухом топливе; Wp — влаги 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^o + %W^o.

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 горючих и негорючих газов. В его состав могут входить следующие газы:

горючие — окись углерода CO, водород H₂, метан CH₄, этилен C₂H₄, этил C₂H₆, 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 сгорания¹, под которой понимают количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы или объема топлива. При этом удельную теплоту сгорания твердого и жидкого топлива относят к 1 кг, а газообразного топлива — к 1 м³.

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

Удельная теплота сгорания может быть отнесена к органической, горючей или рабочей массе топлива, ввиду чего к букве H 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 сгорания 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 сгорания, так как превращение воды в пар, требующий затраты теплоты, снижает удельную теплоту сгорания топлива. Между верхним и нижним пределами удельной теплоты сгорания, обозначаемыми соответственно через H_в и H_п, существует следующая зависимость:

$$H_{п} = H_{в} - 600 \frac{9H + W}{100} \quad (23)$$

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

Удельная теплота сгорания 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 сгорания топлива по его химическому составу имеют следующий вид:

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

где H — удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг; q_C, q_H, q_S — теплоты сгорания соответственно 1 кг углерода, водорода и серы, кДж, с учетом эмпирических поправок на связанное, а не на свободное состояние этих элементов в топливе; C, H и S — содержание этих элементов в топливе, %.

¹Удельная теплота сгорания топлива обозначается буквой H и имеет размерность 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 наиболее часто применяют формулу Д. И. Менделеева

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

Коэффициенты 81, 300 и 26, стоящие перед С, Н и S, выражают значения теплоты сгорания соответствующих элементов, деленные на 100. Коэффициент 26, стоящий перед О, 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

$$H_u = 81C + 300H - 26(O - S); \quad (26)$$

для нижнего предела удельной теплоты сгорания

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

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

$$H_u = \frac{3020 CO + 2580 H_2 + 8550 CH_4 + 14 100 C_2H_4 + 5520 H_2S}{100}, \quad (28)$$

где CO, H_2 , CH_4 , C_2H_4 и H_2S — 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 натурального 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 сжигается 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 (CH_4), 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 полном сжигании кускового топлива при недостатке воздуха. Помимо газификации в газогенераторах превращение угля в горючий газ возможно и в угольных пластах, залегающих в недрах земли. Средний состав газа при подземной газификации угля (в %): CO_2 — 8; CO — 18; CH_4 — 4; H_2 — 18; N_2 — 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 парафиновых (C_nH_{2n+2}), нафтеновых (C_nH_{2n}) и ароматических (C_nH_{2n-6}) углеводородов, которые могут находиться в различных соотношениях.

Зольность и влажность нефтяного топлива ничтожно малы, так как нефть и продукты ее переработки не растворяют минеральных веществ 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 сырье для получения нефтепродуктов, используемых в различных областях народного хозяйства. Нефтяные остатки, остающиеся после извлечения из нефти различных продуктов, называют 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 парафинистый и непарафинистый.

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 парафиновых углеводородов.

В последнее время освоено получение искусственного топлива из каменных углей путем гидроарования их и неокислительного синтеза так называемого сингаза из водяного генераторного газа.

Применение топлива, полученного из нефти, для печей по производству силикатов в настоящее время ограничивается. В недалеком будущем все оттапливаемые нефтяным топливом печи подлежат переводу на плавящее или газообразное топливо.

Твердое топливо. К твердым топливам относят ископаемые угли, горючие сланцы, топливные шлаки и торфы. Ископаемые угли — главные виды промышленного топлива. Среди ископаемых углей выделяют бурые угли, каменные угли и антрациты.

Характерная особенность бурых углей — разница между удельной теплотой сгорания горючей массы и удельной теплотой сгорания рабочего топлива 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 (влаги, пыли, а иногда и серы); большим количеством легкого испаряемого вещества; склонностью к самозогащению при продолжительном хранении на складе.

Каменные угли по своему составу и свойствам имеют широкий интервал колебаний. В связи с этим общей классификации, 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 сгорании мало летучих; они не коксуется, их удельная теплота сгорания в рабочем состоянии близка к показателю условного топлива ($\sim 29\ 808$ кДж/кг).

Горючие сланцы образовались путем прокатывания глинистых, мергелистых, известняковых и других горючих пород продуктами разложения некоторых видов органических веществ.

Сланцы — многозольное топливо: в них содержится 40—60% золы. Содержание летучих в сланцах достигает 70% и выше.

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

К местному топливу относят также котельный шлак, паровозный игарь и другие топливные отходы, содержащие много несгоревшего углерода. Содержание горючего вещества в шлаке составляет 40%, а теплота сгорания — 8480—16 760 кДж/кг.

Среди местных твердых видов топлива следует отдельно выделить торф. По запасам торфа Советский Союз занимает первое место в мире. Торф представляет собой продукт разложения различных растительных остатков во 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 сгорания торфа в рабочем состоянии 10 475—14 600 кДж/кг.

Пылевидное топливо — главный вид топлива в цементной промышленности. Пылевидное топливо получают путем помола ископаемых углей или горючих сланцев.

Сжигание топлива в виде пыли имеет следующие преимущества перед сжиганием его в виде кусков: быстрое и полное сгорание вследствие хорошего перемешивания пылевидного топлива с воздухом; высокая температура сгорания благодаря малому избытку воздуха, обеспечивающего полную сгорание; удобство обслуживания топок и печей вследствие легкости регулирования процесса горения; возможность наиболее эффективного использования низкосортных видов топлива.

Тонкость помола зависит от содержания горючих летучих веществ и золы в топливе; топливо с небольшим содержанием летучих должно потергаться более тонкому помолу.

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

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

Индивидуальная система предусматривает установку углеразмельчальных 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 предусматривают индивидуальные размольные установки, в которых совмещены размол и сушка углей в мельнице.

§ 13. ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

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

Подвергаясь нагреванию, топливо при 105—110 °С теряет свою влагу. При температуре примерно 150—180 °С начинается разложение топлива на летучие вещества и твердый остаток — кокс. При дальнейшем нагревании топливо последовательно и начинается горение. Как правило, чем больше летучих горючих веществ выделяется при разложении топлива 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 создается, 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 тления 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.

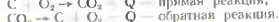
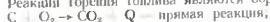
Для протекания реакций окисления в процессе горения необходим непрерывный подвод воздуха к горящему топливу. При невысоких температурах продолжительность химических реакций значительно больше времени, необходимого для подвода кислорода к горючим элементам топлива. Полное время горения в данном случае 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 образующихся 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 сказывается менее, чем в кинетической.

При дальнейшем повышении температуры влияние ее начинает сказываться 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 незначительна 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, определяют с помощью общих уравнений реакции горения, из которых может быть получена формула:

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

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, подчиняемого 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):

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

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

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

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

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 установлен необходимый расход воздуха, который носит название практического, или действительного, 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):

$$\alpha = \frac{L_d}{L_T}. \quad (33)$$

откуда действительное количество воздуха

$$L_d = \alpha L_T. \quad (34)$$

Избыток воздуха оказывает огромное влияние на процесс горения топлива. Увеличение избытка воздуха полезно 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	Состояние	Избыток воздуха, %	Коэффициент избытка воздуха
Твердое	30—100	1,3—2	Жидкое	15—25	1,15—1,25
Жидкое	20—25	1,2—1,25	Газообразное	5—20	1,05—1,2

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

$$\alpha = 21 [21 - 79 (O_2 + N_2)] \quad (35)$$

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 метан CH_4 . В этом случае коэффициент избытка воздуха определяют по следующим уравнениям:

$$\alpha = 21 \left/ \left[21 - 79 O_2 - \frac{(CO + 2H_2)}{N_2} \right] \right. \quad (36)$$

или

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \left(O_2 - \frac{H_2(CO + H_2) + 2(-2CH_4)}{N_2} \right)} \quad (37)$$

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 углеродом воздуха.

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

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

$$G_t + G_a = G(CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2) + Z \quad (38)$$

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	Золь 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: calorиметрическая, максимальная, calorиметрическая, теоретическая, практическая.

Calorиметрической 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.

Calorиметрической 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 calorиметрической тем, что при ее определении следует учитывать влияние эндотермических реакций диссоциации двуокиси углерода (CO_2) и воды (H_2O) в продуктах горения.

Все три вышеприведенных 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. Достижимую практически при горении топлива температуру называют практической температурой горения топлива.

Отношение практической температуры горения к теоретической носит название пирометрического коэффициента горения. Обычно его принимают равным 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:

$$H_p^0 = C_{n,г} V_{n,г} t_{x,г} \quad (39)$$

где H_p^0 — удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг или кДж/м³; $C_{n,г}$ — теплоемкость продуктов сгорания топлива, кДж/(м³ · °C); $V_{n,г}$ — объем продуктов сгорания топлива, м³; $t_{x,г}$ — теоретическая температура, °C.

Решая это уравнение относительно $t_{x,г}$, имеем

$$t_{x,г} = H_p^0 / C_{n,г} V_{n,г} \quad (40)$$

Для решения этого уравнения, как правило, применяют способ подбора значений с последующей интерполяцией аналитическим или графическим путем. Прямое решение затруднено, так как теплоемкость 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:

$$t_{x,г} = \frac{H_p^0 + C_{в,г} V_{в,г} t_{в,г} + C_{г,г} V_{г,г} t_{г,г}}{C_{n,г} V_{n,г}} \quad (41)$$

где H_p^0 — удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг или кДж/м³; $V_{в,г}$ — объем воздуха, израсходованного на горение, м³; $C_{в,г}$ — теплоемкость воздуха, кДж/(м³ · °C); $t_{в,г}$ — температура подогрева воздуха, °C; $V_{г,г}$ — объем газообразного топлива, м³; $C_{г,г}$ — теплоемкость газообразного топлива, кДж/(м³ · °C); $t_{г,г}$ — температура подогрева газообразного топлива, °C; $V_{n,г}$ — объем продуктов сгорания топлива, м³; $C_{n,г}$ — теплоемкость продуктов сгорания топлива, кДж/(м³ · °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 точечные 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 шуровочной планкой. Колосниковая решетка этой топки состоит из плит с отверстиями диаметром 6 мм для подачи воздуха. Шуровочная планка совершает возвратно-поступательные движения из-под колосниковой решетки; 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-переставляющими колосниками (рис. 7, в).

В точечных устройствах с неподвижной колосниковой решеткой сжигают древесину, торф и уголь, за исключением спекающихся и тощих углей.

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

В полугазовых топках горение топочных газов происходит в рабочем пространстве печи. В этих топках используют топливо с большим количеством летучих: торф и длиннолиственные угли. Воздух, необходимый для процесса горения, подают в два приема: первый раз воздух подают под колосниковую решетку с целью поджечь полуугаза, второй раз — в верхнюю часть топочного устройства или рабочее пространство печи. Как правило, чем больше толщина слоя топлива, находящегося на колосниковой решетке, тем больше образуется продуктов неоконченного сгорания. Для различных видов топлива предельная толщина слоя, находящегося на колосниковой решетке, различна и составляет для торфа 1 м; бурого угля 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 °C. Удельная теплота сгорания полуугаза невысока — 2500—4000 кДж/м³; его состав по компонентам колеблется в следующих пределах: CO₂ 10—15%, CO 7—20%; H₂ 5—12%; N₂ 50—60%.

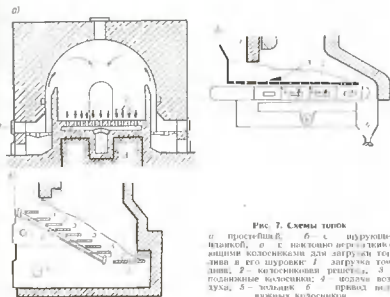


Рис. 7. Схемы топков:
а — простейшая; б — с шуровочной планкой; в — с наклонно-переставляющими колосниками для загрузки топлива и его шуровки; 1 — загрузка топлива; 2 — колосниковая решетка; 3 — подвижные колосники; 4 — подача воздуха; 5 — толкатель; 6 — привод толкающих колосников

ФОРСУНКИ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Основной метод сжигания жидкого топлива — распыление с помощью форсунок. Перед процессом сжигания жидкое топливо, например мазут, предварительно подогревают с целью снижения его вязкости.

Процесс сжигания жидкого топлива состоит из следующих стадий: распыления жидкого топлива до тонкодисперсного состояния, испарения, т. е. превращения жидкого топлива в паровую фазу, смешивания паровых горючих элементов с воздухом, воспламенения и горения газифицированной горючей смеси.

Тип форсунок различают по способу распыления топлива: а) за счет энергии распыляющей среды; 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 распыляющей 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 вышеописанной форсунки является то, что внутренняя мазутная трубка и окружающая ее внешняя воздушная труба образуют расширяющееся сопло, в котором статическое давление распыляющей среды практически полностью преобразуется в скоростной напор. В результате достигаются большие скорости истечения, и мазутная струя подвергается сильному дроблению.

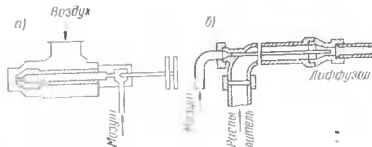


Рис. 8. Форсунки

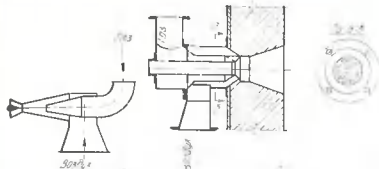


Рис. 9. Наиболее распространенные конструктивные схемы газовых горелок

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

Ко второму типу относят механические форсунки, снабженные наконечниками различной конфигурации. Наибольшее распространение получили форсунки с винтовыми или тангенциальными каналами, 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 сгорает 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 газозабогащенная 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 горелки имеют 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 теплоизлучением, 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 накладываются 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 наименьшем избытке воздуха. Для жидкого топлива предпочтительнее форсунки низкого давления. Удельная теплота сжигаемого топлива в этом случае особого значения не имеет, поэтому можно использовать низкосортное топливо.

Для получения заданной температуры теплоносителя перед входом в рабочее пространство печи топочные газы следует разбавлять воздухом 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 сопел горелок в печах должно быть таким, чтобы непосредственная радиация факелов на поверхность нагрева была минимальной и чтобы во 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 углеводородов 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 естественной карбюрации 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 стенками и пламенем.

При использовании жидкого топлива целесообразно применять форсунки низкого давления, так как форсунки высокого давления дают длинный факел, которому свойствен 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 предпочтительно нужно отдавать тем видам топлива, которые создают светящиеся пламя, например: газообразные топлива, содержащие углеводороды и смолы, различные сорта мазута и пылевидное топливо. Рассеиваемый 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 сохранило 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 «сосредоточенное» пламя.

При направленном косвенном радиационном режиме работы печей требования к светимости пламени значительно меньше, 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. Успешно 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 жидкого топлива, 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 ходящую 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 летучего углерода (85—90%), например, древесный уголь, кокс, т. е. топливо, освобожденное 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 вводить практически любые виды топлива, обеспечивающие при сгорании необходимый температурный уровень. На практике для этой цели используют малосернистое и малосерни-

стое 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 подается вместе с воздухом через решетку, расположенную ниже слоя. Предварительного смешивания 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 слоевом 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 посредством 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 на поверхности материала; перехода пара с поверхности

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

Движение влаги внутри материала зависит в основном от его структуры и происходит под влиянием градиента влажности (влагодиффузия) и градиента температуры (термовлагопроводность) 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 прямо 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.

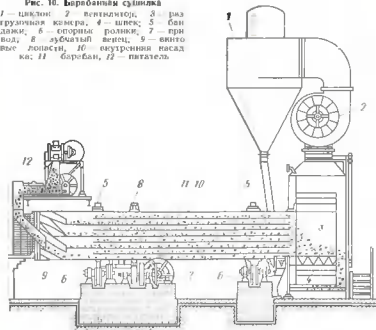
Тем не менее ко всем сушилкам предъявляются следующие общие требования: максимальная скорость сушки и высокое качество высушенного материала; минимальный расход тепла на единицу продукции; равномерность процесса сушки по всему объему сушилки; легкость управления процессом сушки.

§ 16. СУШИЛКИ ДЛЯ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для сушки сырьевых материалов на современных заводах используют барабанные, ленточные, пневматические и распылительные сушилки. Теплопередача 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 используют 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, движущимся 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. Барабанный сушилка
1 — шпатель; 2 — ленточный; 3 — разгрузочная камера; 4 — шнек; 5 — бандажи; 6 — опорные ролики; 7 — приподъем; 8 — зубчатый шестерня; 9 — винт; 10 — внутренняя насадка; 11 — барабан; 12 — питатель.



Для интенсификации работы сушилки барабаны снабжают различными системами внутреннего теплообменного устройств, из которых наиболее часто применяют лентные и подково-лопастные системы. С входного конца барабана устанавливаются лопастные или ковши для равномерной загрузки материала по сечению сушилки. Высушенный материал снимается в бункер, находящийся в разгрузочной камере, и удаляется конвейером.

Производительность барабанных сушилок характеризуется количеством влаги, испаряемой в 1 м³ 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 попадает 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 снизу из калорифера. Организация нижней подачи теплоносителя способствует смягчению режима сушки и сохранению гранул.



Рис. 11. Ленточная сушилка

1 — камера сушилки; 2 — бесконечная лента; 3 — нагревательная спираль; 4 — питатель; 5 — нагревательная спираль; 6 — нагревательная спираль.

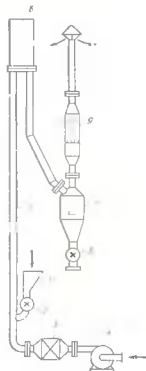


Рис. 12. Пневматическая сушилка

1 — труба; 2 — питатель; 3 — нагревательная спираль; 4 — нагревательная спираль; 5 — нагревательная спираль; 6 — нагревательная спираль.

Пневматические сушилки (рис. 12) предназначены для сушки мелкокусковых материалов со средним размером отдельных частиц до 20 мм 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 падения наиболее крупных кусков (обычно 10—40 м/с). Вследствие кратковременности контакта теплоносителя с материалом (1—5 с) эта сушилка пригодна для термически нестойких 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 адиабатического испарения чистой влаги.

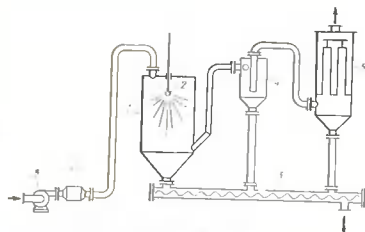


Рис. 13. Распылительная сушилка

1 — камера сушилки; 2 — форсунка; 3 — шнек для высушенного материала; 4 — циклон; 5 — разгрузочный фильтр; 6 — вентилятор; 7 — калорифер.

Распылительные сушилки снабжают аппаратами для улавливания уносимых частиц высушенного 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 обогриваются горячим воздухом, а иногда и продуктами сжигания твердого топлива в кольцевых печах. С заменой кольцевых печей на туннельные периодические сушилки также заменяются гонимыми.

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

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

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

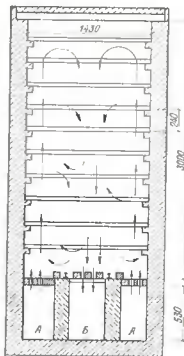


Рис. 14. Камерная сушилка периодического действия

систия. Поддержание заданного режима сушки осуществляется квалифицированным персоналом или сложными системами автоматического регулирования по заданной программе. Преимущества сушилок непрерывного действия особенно ярко проявляются 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 отработавшего теплоносителя удаляется в атмосферу, а другая возвращается в сушилку после охлаждения 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 подсосом 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 сжигающим 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 зачисляется 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 продвигаются через канал в соответствии с заданным режимом сушки. Эти сушилки получили широкое распространение преимущественно в производстве огнеупоров и кислотоупоров, грубой строительной керамики, санитарной керамики и крупногабаритных изоляторов. По схеме циркуляции теплоносителя туннельные сушилки можно разделить на противоточные и многозональные 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 устраняются дополнительные трудоемкая загрузка и разгрузка сушильных вагонеток.

Загрузка печных вагонеток автоматами, 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 прохождение через саду 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-

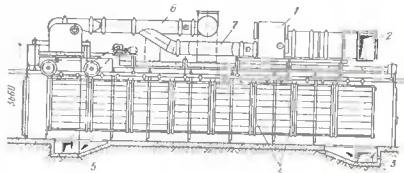


Рис. 15. Противоточная сушилка с рециркуляцией воздуха
1 — калорифер; 2, 3 — каналы для подачи воздуха; 4 — канал выхлопной; 5 — канал для отбора отработавшего воздуха; 6 — труба; 7 — канал для повторного использования воздуха

носителя возвращается вентилятором в зону усадки изделий, изготовляемых методом пластического формования, через каналы 3. Возвращаемый теплоноситель 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 повышенные требования к режиму сушки и точности регулирования работы сушилок. Этим требованиям в производстве среднегабаритных изделий удовлетворяют многосонные 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, загружаемые изделиями у рабочих мест формовщиков. Зональные сушилки объединяют в блоки по четыре—шесть линий, каждая из которых имеет отдельный цепной толкатель для регулирования продолжительности сушки. При разных режимах сушки линии в блоках разделяют перегородками, и скорость сушки в них регулируют количеством теплоносителя, подаваемого в разные зоны.

Рециркуляцию газов в отдельных зонах осуществляют вентиляторами, а температуру — калориферами, размещаемыми в целях экономии площади на перекрытиях сушилки или в подвальном помещении. В виде примера приводим описание наиболее распространенной многосонной сушилки, которая может использоваться для сушки среднегабаритной технической керамики, санитарных, кислотоупорных 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 выложены из теплоизоляционного кирпича. Перекрытие сушилки — железобетонная плита с теплоизолирующей засыпкой. Рельсы для подвесных вагонеток поддерживаются подвесками, укрепленными на фермах цехового перекрытия.

Вагонетки движат через туннель четырьмя самостоятельными цепными толкателями 1. Каждый ряд вагонеток может двигаться с разным ритмом толкания, 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 циркуляции паровоздушной смеси в отдельных зонах сушилки расположены в подвальном помещении, которое по условиям не может использоваться для иных производственных нужд.

В одноэтажном здании вентиляторы и калориферы устанавливают на стальном каркасе перекрытия сушилки.

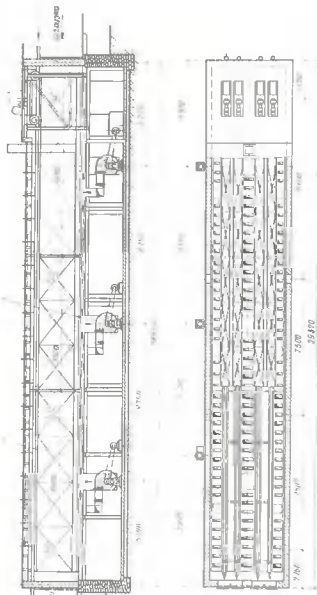


Рис. 16. Схема туннельной многосонной сушилки
1 — цепной толкатель, 2 — вагонетка, 3 — вентиляторная установка, 4 — калорифер, 5 — перегородка

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 кондиционную паровоздушную смесь по длине зоны у боковых стен туннеля и шибров, регулирующих работу установок. Влажный отработанный воздух засасывается 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 избыточного воздуха и много отработанного влажного, температура паровоздушной смеси под-

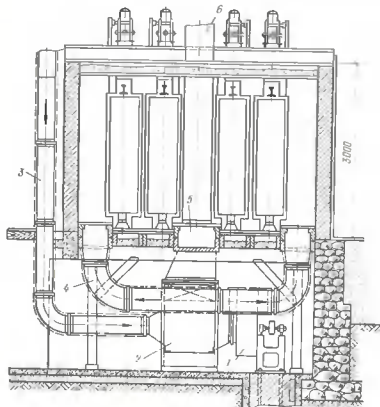


Рис. 17. Схема вентиляционной установки сушилки

1 — вентилятор, 2 — смесительная камера, 3 — труба для подачи горячего воздуха, 4 — труба, разводящая 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 воздухоотводящему каналу 5.

КОНВЕЙЕРНЫЕ СУШИЛКИ

Конвейерные сушилки отличаются от туннельных перечислением изделий в канале или в камере ленточными, ролликовыми и полочными конвейерами. При одноярусной загрузке конвейером конвейерные сушилки не могут конкурировать с туннельными в производстве массивных или крупноабразивных полых изделий. Поэтому их используют преимущественно для сушки по скоростным режимам малогабаритной технической керамики, облицовочных плиток, хозяйственного фарфора и фаянса. Наибольшее признание получили конвейерные сушилки с использованием горячего воздуха (тепловых 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 поточным (ленточным) конвейером, перемещающим изделия в сушильной камере по сложной петлеобразной трассе, впервые появились в производстве хозяйственного фарфора и фаянса. Свободно подвешенные полки выносной ветви 5 (рис. 18) конвейера 3 подводят к формовочным полуавтоматам 4 и загружаются заформованными в гипсовые формы изделиями. У разгрузочной ветви 2 сушилки изделия снимаются с форм на конвейер 1. На этом конвейере организуется поточная обработка насушенных изделий. Гипсовые формы, оставшиеся на полках, подводят выносной ветвью 5 конвейера к полуавтоматам 4. Выносными ветвями полочного конвейера без ручной работы конвейерные сушилки включаются в механизированные и автоматические линии керамических заводов.

Конструкция шарнирной 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 П-образные камеры, в которые через каналы подается теплоноситель из калорифера или из зоны охлаждения туннельных печей. Шибрами регулируют подачу теплоносителя и интенсивность теплообмена в отдельных камерах сушилки.

Горячий воздух циркулирует по принципу противотока с высушиваемым полуфабрикатом. Сушилки с ленточными конвейерами работают с однократным насыщением воздуха и высокими скорости

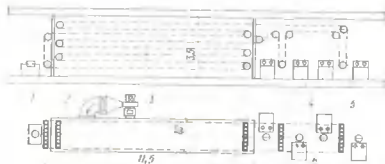


Рис. 18. Схема сушилки с горизонтальными конвейерами

1 — конвейер для загрузки изделий в секцию; 2 — разгрузочное око; 3 — конвейер для горизонтальных изделий; 4 — разгрузочный; 5 — конвейер для

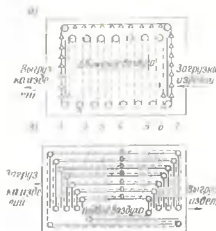


Рис. 19. Схемы сушилок

с вертикальными ветвями конвейера; 6 — с овальными зонами обогривания

женной циркулирующей теплоносителя в полостях изделий обусловили недостаточную эффективность сушки в описанных конвейерных сушилках, несмотря на благоприятные возможности влагопередачи в тонкостенных изделиях.

Метод струйной сушки полых изделий, недавно разработанный и внедренный 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, омывает его дно и стенки, а затем удаляется в атмосферу, не перегревая гипсовую форм. Гипсовые формы, в которых находятся заформованные изделия, с влажностью около 20% не омываются теплоносителем с тем-

ми циркуляции, присматривая при сушке малогабаритных тонкостенных изделий.

Изделия, формируемые способом прессования пластической массы или литьем в гипсовых формах, сушатся в два приема — сначала в формах, а потом после склеивания изделий с приставными деталями. В начальный период влага интенсивно отсасывается в капилляры формы, но после усадки и отделения изделий от поверхности формы этот процесс прекращается и формы меняют непосредственно теплообмену между изделиями и воздухом. Эти условия сушки вместе с за-

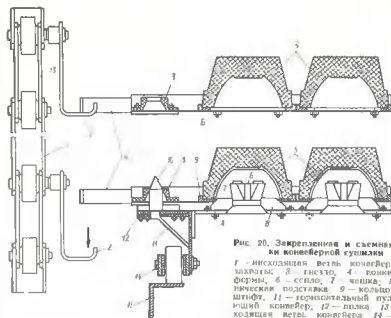


Рис. 20. Закрепление и съемная полка конвейерной сушилки

1 — накопитель ветви конвейера; 2 — захват; 3 — гнет; 4 — ролики; 5 — формы; 6 — слой; 7 — чашка; 8 — ко-шичная подставка; 9 — кольцо; 10 — штифт; 11 — горизонтальный пульсирующий конвейер; 12 — плита; 13 — восходящая ветвь конвейера; 14 — роликовые цепи; 15 — оборотный цилиндр

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

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

Нисходящая ветвь 1 конвейера (рис. 20) непрерывного действия с захватами 2 опускает в положение 1 полку с формами 3 на кольцо 9 полки 12 конвейера 13. Пульсирующий конвейер 13 состоит из двух бесконечных роликовых цепей 11, переключаются полки между положениями А и Б (рис. 21) по время сушки чашек с ритмом, равным 7 с на переключение, 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 дувается горячий воздух. Продолжительность сушки регулируется количеством позиций конвейера 13, на которых включается подача воздуха в полости чашек. Во время сушки размеры чашек сокращаются, они отделяются от формы и опускаются на конические подставки 8 (см. рис. 20), которые предохраняют их от деформации (овальности).

По окончании процесса сушки восходящая ветвь конвейера снимает полку с свободновыпадающими формами и подает с помощью звездочки 1 — 10 (см. рис. 21) в подкатомат 13 для формирования чашек,

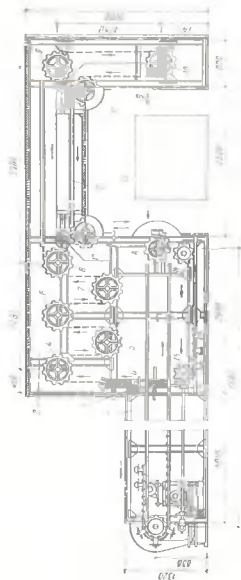


Рис. 21. Конвейерная сушилка с направлением дождем движением воздуха
1 - сушительный конвейер; 2 - сменная полка конвейера; 3 - чашки; 4 - автоматизм; 11 - обрешетка; 12 - форма

а затем на конвейер 2 через блоки 11, 12 в положение 1, где исходящая ветвь конвейера 2 укладывает формы вместе с сырными чашками на полку 12 конвейера 1 в струйную сушилку, размещенную между положениями А и Б этого конвейера. В положении Б полки с освобожденными формами снимаются с полки конвейера 1 восходящей ветвью конвейера 2, и цикл повторяется.

Подсохнувшие чашки при перемещении с положения Б до положения Г снимаются с конвейера 1 для последующей обработки. Освободившиеся от чашек полки нижней ветвью конвейера 1 возвращаются в положение А для укладки на них форм исходящей ветвью конвейера 2 с сырными чашками.

Таким образом, при размещении формовочного автомата 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 влагонепроводностью 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 и по конструктивным соображениям радиационные и радиационно-конвективные сушилки применяются преимущественно в производстве тонкостенных изделий плоской формы при односторонней загрузке. В излучателях 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 проволочных сушилках используют преимущественно панели или трубы, обогреваемые газовыми горелками. Электрические излучатели не применяются из-за относительно высокой стоимости электроэнергии. В сушилках керамических заводов широко используют односторонние ленточные конвейеры из стальной сетки, а родниковые конвейеры — в односторонних и многоярусных сушилках. Радиационные сушилки с ленточными конвейерами используют в производстве облицовочных или

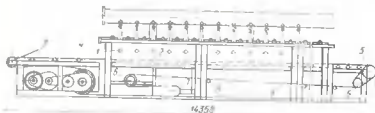


Рис. 22. Радиоконвективная сушилка с ленточным (сетчатым) конвейером

1 — туннель; 2 — вент. ленточный конвейер; 3 — 6 — привода конвейера; 7 — стальной корпус; 8 — стальной корпус; 9 — вентилятор; 10 — вентилятор; 11 — радиационная панель; 12 — патрубок; 13 — труба

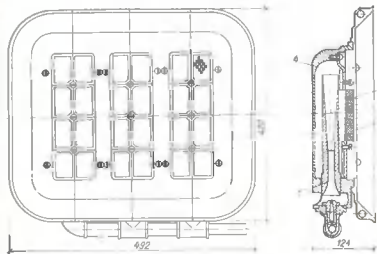
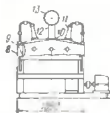


Рис. 23. Устройство панельной радиационной горелки

ток, мелких электроизоляционных и тому подобных изделий. Работа конвейеров сушилок без применения ручного труда взаимосвязана с работой конвейеров, обслуживающих разнообразные процессы обработки в механизированных линиях.

Сушилки с керамическими панельными излучателями и конвейером из проволоочной сетки могут быть использованы в производстве тонкостенных плиток со скоростным режимом нагрева в течение 6 мин и охлаждения в течение 3 мин.

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

Высушенные плитки при температуре около 150°С охлаждаются воздухом, поступающим из стальных коллекторов, расположенных на расстоянии 30 мм от поверхности плиток. Четырехмиллиметровые отверстия коллекторов, размещенные с шагом 25 мм, обеспечивают равномерное охлаждение плиток в течение 3 мин. Панельные излучатели можно использовать лишь для одностороннего нагрева плиток сверху, при нагреве снизу отверстия в керамических плитках излучателя засоряются.

Сушильный канал собран из пяти секций длиной по 2,25 м. В трех секциях сушилки нагрев изделий осуществляется радиационными излучателями, а в двух секциях — конвективным потоком продуктов сгорания газа. В результате теплотехнических исследований был разработан режим сушки фаясовых плиток,

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

Рассматриваемая сушилка имеет следующие характеристики:

температура газовой среды на расстоянии 150 мм от поверхности плиток 90–100°С;

температура отходящих газов 100–120°С, число работающих излучателей 34–36;

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

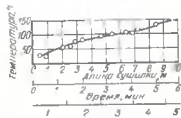


Рис. 24. Кривая радиационного нагрева фаясовых плиток

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 печей периодического действия кольцевые и многокамерные стали заменять туннельными. Многокамерные печи сохранились в основном для производства уникальных высокохудожественных изделий разнообразного ассортимента, а также для исследовательских работ в лабораториях, институтах и для производства в полувальмовых условиях. Отметим особенности устройства и работы некоторых типичных печей периодического действия.

Напольные печи, применявшиеся для обжига кирпича, имели стены, выложенные из обжигаемого в этих печах сырья, и кирпичные топки для сжигания твердого топлива. Штабель кирпича сырьем перекрывали уложенными пластами 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 заменяли многокамерными и кольцевыми печами.

Камерные печи с нисходящим пламенем в соответствии с гидравлической теорией распыления 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 подразделяют на прямоугольные и круглые однокамежные печи для обжига огнеупоров 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 диаметром до 1,2 м.

Прямоугольные печи объемом до 220 м³ и размером 14 × 4,2 × 3 м применяют для обжига dinasовых, магнетитовых и других огнеупорных крупногабаритных фасонных изделий, обжигаемых по различным режимам. Такого же типа печи используют иногда и при обжиге крупногабаритных кислотоупорных изделий и канализационных труб. В удлиненной камере печи устраивают несколько пар топок для твердого топлива и канализированный под для отбора топочных газов дымососом через бороз. 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 стенки предусматривают иногда отверстия для регулирования нагрева изделий и прилегающей части садки. При использовании в высокотемпературных печах жидкого топлива или газа в топочных камерах устанавливают форсунки или горелки.

В США большие периодические круглые печи с диаметром камеры около 9,5 м и высотой от уровня пода 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 огнеупоров, канализационных труб и тому подобных изделий.

ОДНОКАМЕРНЫЕ КРУГЛЫЕ ПЕЧИ (ГОРНЫ)

Однокамерные печи (горны) с нисходящим пламенем до внедрения туннельных печей наиболее широко применялись 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 заменяют более экономичными туннельными печами. Использование однокамежных печей обусловлено с более производительными печами объясняется некоторыми удобствами эксплуатации этих печей. Отдельные виды керамической продукции, например декоративную керамику и изделия «пестрого» ассортимента, проще обжечь в 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 темпом обжига и некоторыми другими, менее значительными факторами.

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

Типичная однокамежная круглая печь с нисходящим пламенем для первого (бисквитного) обжига фаянса (рис. 25) имеет объем 164 м³, диаметр 7,8 м, высоту от уровня пода до замка свода 4,4 м и восемь топок для твердого топлива.

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

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

Эмпирически принято и вполне оправдывается теорией движения газов увеличение живного 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 полевошпатного фаянса на бисквит можно 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 полнотой втором обжиге фаянса теплосработка 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 полнотой фаянса обуславливаются лишь термической стойкостью обжигаемых изделий и необходимостью выравнивания температуры по всей камере к началу плавления глазури. Это обеспечивает одинаковый для всех обжигаемых изделий период плавления глазури, ее хороший разлив и получение гладкой блестящей поверхности. Полнотой 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, отсюда и происходит общепринятое в производстве керамических изделий понятие «утильный обжиг»).

Утилизация тепловых отходов, как правило, конструктивно решается путем постройки второй, а иногда и третьей камер, 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 проходе 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 качествам температур обжига. В связи с этим во вторых этажах этих печей обычно производят обжиг фарфора на бисквит и канисел.

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 электроизоляционного фарфора конструкция двухэтажных горнов многократно изменялась при очередных ремонтах в целях большей равномерности и удобства регулирования обжига.

В наиболее распространенном варианте такого горна в его нижней камере обжигается на твердом топливе глазурованный фарфор при температуре 1320—1350° С. Газы на топке 1 (рис. 26) поднимаются в подовое пространство, а затем исходящими потоками через каналы между столбцами канисел и подовые отверстия 2 в сборные каналы 3, размещенные в толще нота камеры. Отработанные горячие газы через вертикальные каналы 4, обычно размещенные в стенах камеры между колонными вылетами, и через подовые каналы второго этажа 5 поднимаются в первую камеру. Обращенный поток печных газов в полнотой камере при правильной конструкции основных элементов горна дает хорошее заполнение ее пламенем, равномерный обжиг и высокое качество продукции, во требует высокого мастерства обжигальщиков для регулирования температуры и составления ее в окислительный и восстановительный периоды обжига.

Большинство горнов этого типа работает во втором этапе по принципу походящего потока газов, которые, поступая из подовых вылетов, проходят через загрузку утильной камеры и удаляются в трубу. Поэтому для данной группы печей название «горны с обжигом глазури» не совсем корректно.

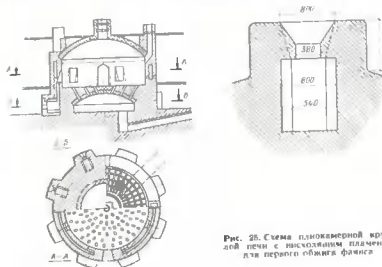


Рис. 26. Схема плоскокамерной круглой печи с высокотемпературным пламенем для первого обжига фаянса

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 непродолжительный нагрев на втором этаже приводит к неравномерному обжигу бисквита с преобладанием недожога.

Конструктивным недостатком горнов этого типа являются малая устойчивость футеровки стен и купола полноты камеры, топочных вылетов и вертикальных газопроводов, 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 устраняться после Великой Октябрьской социалистической революции, когда развертывался 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 охлаж-

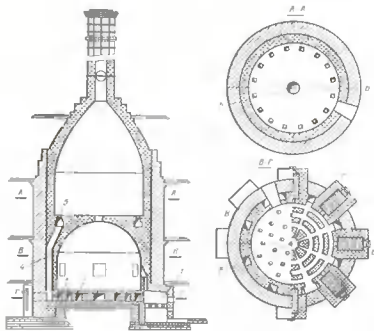


Рис. 26. Схема двухэтажного горна с нисходящим пламенем в первой камере и нисходящим во второй

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

При реконструкции круглых горнов были разработаны в основном 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 наиболее простом и легком обслуживании топочных устройств, быстром охлаждении камер, минимальном расходе топлива, сокращении простоев печи и затрат на капитальные и текущие ремонты, а также решении некоторых других задач местного значения.

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

Из каждой топки 1 пляя поступает в самостоятельный канал 2, размещенный под подом, и через вертикальные подовые вылеты подается в капсельную садку изделий и под свод полноты камеры. Омытая столбы капселей, 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, заложеными в стенах и выходящими в подподовую газообразную камеру 5. Из сборной камеры газы удаляются в дымовую трубу горна.

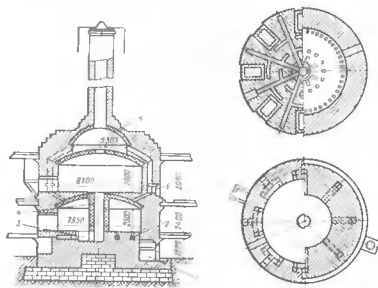


Рис. 27. Двухэтажный горн с нисходящим пламенем в первой и второй камерах

Для ускоренного охлаждения нижней камеры в ее своде устроены каналы, сообщаемые 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 топочных 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.

Недостаток этой конструкции — довольно сложная система газозаходов и двойных сводов, перекрывающих полноту 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 топков. При значительном гидравлическом напоре газов и сопротивлении подовых каналов недостаточная подача полугаза или воздуха из отдельной

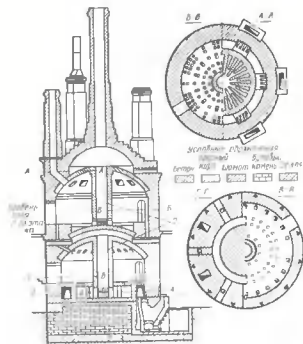


Рис. 28. Двухкаменный горн с полугазовыми топками и центральными трубами выносным дымоходом

1 — полутопочный топков; 2 — центральная труба; 3 — распределительное кольцо

топки регулируется смежными 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 топков описанного горна относятся регулируемый, устойчивый режим их горения, возможность подсушивания влажного топлива (дров или торфа) в шахте топки, устойчивая температура печных газов и удобство загрузки топков, 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, каменных 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.

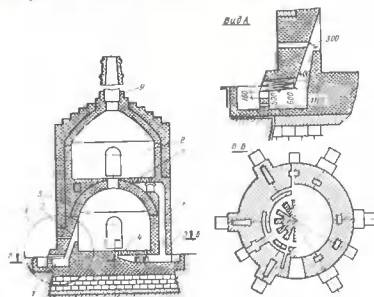


Рис. 29. Двухкаменный горн для обжига керамических изделий завода, работающего на природном газе

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 газурованные изоляторы в ней дожигаются при температуре 1300—1350°С.

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), подводящими 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 приемке 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 осей форсунок. Через смотровое отверстие 4 контролируют температуру топочных газов. Подвальный приемок перекрывают решетчатым козлаком 5.

Длину и температуру факела в топке и в загрузке капселей с фарфором регулируют распылением воды форсункой и монтапро-

ванной в корпус стандартной газовой горелкой ГНП-6. При удорожании 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 топлива на 1 м³ личного объема 173 кг.

Удельный расход на 1 т загрузки (брутто — фарфор — капсели) камеры первого этажа 426 кг/т.

Удельный расход топлива на 1 т обожженного (глазурированного) фарфора 2132 кг/т.

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

Ассортимент обжигаемых изделий: чайники, пиалы, тарелки, чашки, кружки.

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

Масса капселей в камере первого этажа 52—55 т.

Температурное поле в нижней камере по контролю пирометрами: в верхней части 1355°С, в нижней — 1340°С, в средней части и в периферийном кругу капселей 1350°С.

Температура предварительного обжига фарфора в верхней камере 800—1000°С 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 выходящим пламенем в выходящей в верхней камере рабочей камере на дровах	Горн с выходящим пламенем в выходящей в верхней камере рабочей камере на дровах	Горн с выходящим пламенем в выходящей в верхней камере рабочей камере на дровах
Диаметр пода первого этажа, м	7,9	7	7,48
Объем камеры первого этажа, м³	132	124,5	154
Диаметр пода второго этажа, м	8,1	7,72	7,6
Объем камеры второго этажа, м³	165	188	165
Число топков	8	8	10
Живое сечение (суммарное) колосниковых решеток, м²	2,1	—	—
Объем топочного пространства, м³	12,6	21	3
Конечная температура обжига полнотой камеры (средняя), °С	1350	1350	1350
Расход условного топлива на 1 м³ полнотой камеры, т	0,18	—	0,173

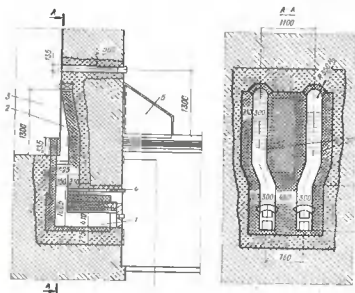


Рис. 30. Конструкция газовой топки

жесткость 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 за счет печных 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:

$$0,15 + 11,28 = 3,53 \pm 0,18 = 6,73 = 1,18 = 23\%.$$

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, внесенное с воздухом	6 908 310	0,9
4. Физическая теплота загрузки фарфора	284 920	0,03
капселей	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 капселей	93 680 020	11,28
3. На обжиг изделий	29 091 170	3,53
4. На испарение влаги, необходимой для повышения температуры	9 619 680	1,16
5. На испарение влаги изделий в сушильной камере	1 575 440	0,18
6. На нагрев капселей и обжиг их в сушильной камере (второй этаж)	56 866 680	6,73
7. На угловый обжиг изделий	8 974 980	1,18
8. Потери с уходящими газами и с нагретым воздухом (при охлаждении)	515 570 500	62,15
9. Потери в окружающую среду через клапаны	63 935 210	7,36
10. Потери с выгруженными из печи и капселями	10 835 340	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 продолжительностью 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 выдвинутом из печи поду (футерованной платформе) в нормальных атмосферных условиях и с использованием необходимых подъемно-транспортных устройств.

Печь, предназначенная для обжига крупногабаритных изделий, имеет прямоугольную камеру длиной 5—6 м, шириной 2,5—3 м, оборудованную топками 1 (рис. 31) и двумя вагонетками 2, образующими футерованный огнеупором под печи. В топках устанавливают форсунки для мазута или горелки при использовании природного газа. Конструкция вагонеток печи аналогична конструкции вагонет-

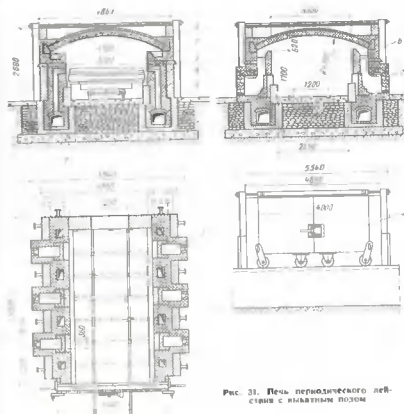


Рис. 31. Печь периодического действия с выкатным подом

гок крупной туннельной печи. Вагонетки камеры печи с выкатным подом уплотняют со стенами печной камеры песочными затворами 3. Вагонетки с загруженными изделиями задирают и камеру через раздвижную двухстворчатую дверь 4, футерованную огнеупорными и теплоизолирующими камнями. Камера печи перекрыта сводом, опирающимся за пределами топочных вылетов на стены печи, связанные каркасом из балок 5. Пламя из топок 1 через перевальные стенки 6 поднимается под свод, а затем опускается на под вагонеток, омывая загруженные на нем изделия. Отработанные газы удаляются через расположенные в стенках печи вылеты 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

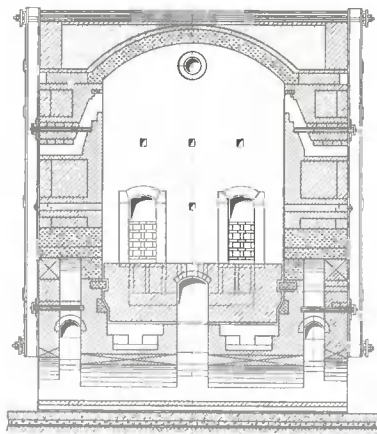


Рис. 32 Однокамерная печь с выкатным подом для обжига высоковольтных изоляторов

объеме производства целесообразно разделить 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 торцевой стене и в откатных дверях печи.

КОЛЬЦЕВЫЕ И МНОГОКАМЕРНЫЕ ПЕЧИ

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

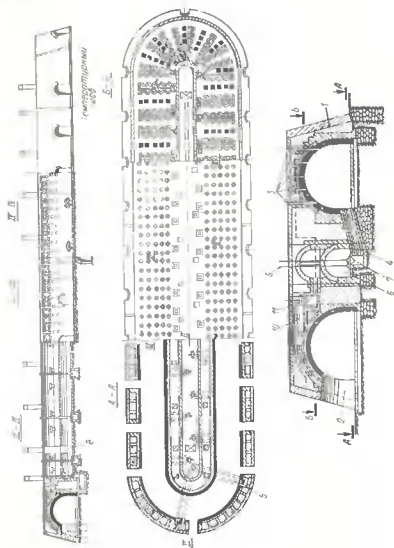
Канал туннельной печи разделен на три стабильные зоны, через которые проходят изделия на вагонетках. В кольцевых и многокамерных печах, наоборот, неподвижна садка изделий, а перемещаются зоны подогрева, обжига и охлаждения путем перевода подины топлива, отбора дымовых газов и подачи воздуха для охлаждения 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 сырья 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 загрузке сырья картонным щитом по сечению канала под трубочками (дымовые оешки) 4, установленными в своде для загрузки топлива. После отделения щитом очередной загруженной камеры от рабочей зоны щит на предыдущей камере разрывается крочком через обжиговую трубочку, и открывается конический дилбер 10 для отбора дыма через каналы 11 в общий бор 9. Таким образом, зона подогрева, а затем и зоны обжига и охлаждения перемещаются на одну позицию.

Рис. 33. Колыбельная печь
1 — прямой канал, 2 — поперечный канал, 3 — поперечная перегородка для топления, 4 — дымы трубочки, 5 — подпалы, 6 — подпалы, 7 — жаровый конус, 8 — жаровый конус, 9 — жаровый конус, 10 — жаровый конус, 11 — жаровый конус.



Продолжительностью промежутка между включениями очередных камер и их длиной определяют скорость перемещения цикла обжига (скорость огня) и производительность печи.

Колодцевые печи работают на дробленом твердом топливе, которое подают через каналы в своде печи непосредственно в садку кирпича. Через раскаленную садку проходит горячий воздух, получающий при охлаждении кирпича, за счет чего обеспечивается полное сгорание топлива. В своетовые каналы вставлены чугунные трубки диаметром 150—200 мм с крышками. Ряды трубок 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 вручную или с помощью автоматических питателей (шпур-ашаров). Перестановка аппаратов при переходе на загрузку следующего ряда труб, загрузка питателей топливом и присоединение их к проходящей вдоль печи трансмиссии, а также переналадка аппаратов при изменении сорта топлива усложняют использование автоматических питателей.

По охлаждению кирпича используют больше воздуха, чем требуется для сжигания топлива, поэтому часть горячего воздуха отбирается через трубочки, каналы 8 в своде, конусный шибер 7, паровой боров 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 загрузке, выгрузке и ремонте, числа одновременных циклов (огней), скорости огня и плотности садки кирпича на 1 м³ обжигаемого канала.

Продолжительность обжига находится в обратной зависимости от плотности садки, так как с увеличением плотности садки повышается ее гидравлическое сопротивление и ухудшаются условия теплообмена. При плотной садке (свыше 4300 шт. кирпича на 1 м³ печного канала) скорость огня составляет 17–18 м/сут, а сьем — 1130–1250 шт кирпича с 1 м³ печного канала в месяц.

Применение разрезной сапки (190—200 шт/м³) резко снижает сопротивление нижней части сапки, повышает скорость циркуляции газов и, применяя рассредоточенный их отбор через несколько конусов (шпиров), 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 невысокие требования к его физико-механическим свойствам обусловили простую конструкцию кольцевых печей, их незначительную металлоемкость, минимальные капиталовложения 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: загрузка — одна камера, зона сушки и подогрева — две камеры, зона обжига — полторы камеры, зона медленного остывания — одна камера, зона охлаждения — две камеры, выгрузка — полторы камеры. Общий тепловой баланс кольцевой печи и сушилки приведен в табл. 6.

Таблица 6. Общий тепловой баланс кольцевой печи и сушилки

Статьи баланса	%	Статьи баланса	%
Приход теплоты		Расход теплоты	
1. Химическая энергия топлива, заархсованного в кирпич (спалок, водомосковного угля)	50,3	1. На испарение влаги	42
2. Физическая теплота топлива, заврасываемого через трубок	39,3	2. На химические реакции	13,7
3. Химическая энергия топлива, израсходованного на производство пара для прогресса сыра	10,4	3. С уходящими газами	29,8
		4. С выгруженным из печи кирпичом	0,7
		5. Потери в окружающую среду в результате неполного сгорания, потери пара и глиноземежки и неучтенные потери	13,8
Всего	100	Всего	100

Перевод кольцевых печей с твердого топлива на газ выполняют в наиболее простом варианте с помощью устройства переносных газовых горелок, положенных по месту трубок, используемых для загрузки твердого топлива и присоединяемых к газопроводу,ходящему 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 предпосылках — наличии жидкого топлива или газа и сырья, обеспечивающего устойчивую загрузку 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 Мендгейма работали на генераторном газе из газогенераторов, устройств в одном блоке с печью, что позволяло обходиться без длинных газопроводов и газоочистки.

Прямоугольные камеры обжигаются в два ряда по кольцевому принципу с помощью топлива. Многокамерные печи 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 перевальной стенкой под свод, и затем нисходящим потоком смываются изделия и проходят через канализованный под и канал в стене в следующую камеру. Каждая камера в свою очередь становится последней в потоке дымовых газов. В ней имеется бортик с шибером для отвода дыма через общий коллектор к дымоходу или к трубе. Газ из общего газопровода подается через регулируемый шибер в очередную камеру по каналу, заложенному в под, перисцикулярно потоку горячего воздуха. На охлаждение изделий требуется больше воздуха, чем на сжигание топлива, и часть воздуха с приемлемой температурой отбирается через трубы в сводах камер и направляется в сушилку.

Высокотемпературные печи для обжига опусков 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 сохраняются четкий по размерам и режиму

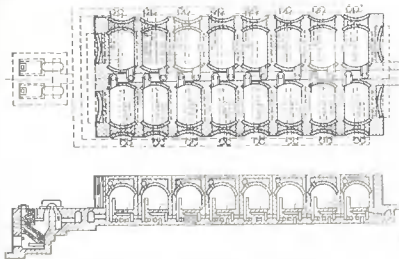


Рис. 34. План и разрез многокамерной газовой печи

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

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

Число камер	12—36
Объем камер, м ³	43—153
Длина " " " "	6,5—8,8
Ширина " " " "	2,5—5,2
Высота " " " "	2—2,4
Число одновременно выполняемых циклов («отпегей»)	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. Норд предложил, а в 1853 г. построил в Дании туннельную печь для обжига кирпича на передвижных вагонетках, которая не получила практического применения вследствие нагрева буж и других частей вагонетки печными газами, проникшими в зону обжига через зазоры между футеровкой вагонетки и стенами печного канала. Лишь в 1877 г., после получения Боком патента на устройство песочных затворов у бортов вагонетки, туннельные печи получают непрерывно расширяющееся распространение в производстве огнеупоров и тонкой керамики, чашечек.

Туннельные печи состоят из канала, через который перемещаются с заданным ритмом изделия на вагонетках или платформах навстречу печным газам.

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

Печи с кольцевыми 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 массового обжига изделий вследствие высокой стоимости электроэнергии. Малогабаритные высокотемпературные электрические туннель-

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

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

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

Разграничение зоны подотгрева и зоны спекания является условным, так как в целях выравнивания температуры верхних и нижних ярусов обжигаемых изделий в зоне подотгрева некоторых печей устраивают нижние щелевые топки небольшой мощности.

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

Поезд вагонеток периодически перемещают гидравлическим толкателем на одну позицию при заданном 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 в зону подотгрева из топочной зоны, определяется разностью между теплотой от

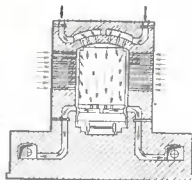


Рис. 35. Воздушная завеса с распределенным нагревом подогретого воздуха в зону подотгрева

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: расщедоточенный 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 сжигание топлива начинается в компактных топочных камерах, размещенных в кладке стен, и заканчивается в печном канале.

В зависимости от степени смешивания газа ил 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 догоранием топлива в садке изделий и таким образом достигается более равномерный нагрев изделий, расположенных вблизи топочных выветов и на некотором отдалении от них.

Обжиг тонкой керамики при недостаточном смешивании топлива с воздухом происходит в перемещающихся окислительной и восстановительной среде и сопровождается значительным выходом некондиционной продукции из-за нестойкой окраски изделий, дефектов глазури и других отклонений от нормативов. Поэтому обжиг тонкой керамики производят в туннельных печах с небольшим сечением канала, оборудованных 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 понижающейся в результате теплоотдачи, не восполняемой завершением сжигания топлива в садке изделий. При обжиге тонкой керамики пламя из щелевых топок обычно направляется в канализированный под вагонеток, собранный из термостойких прочных карборундовых стоек и плит.

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

верхними и нижними рядами садки устраняется интенсивным взаимным излучением изделий при высоких температурах обжига и большой длительностью обжига. Использование 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 кислотоупоров, 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 нескольких 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, dinasовых, магнетитовых, высокоглиноземистых и хромомангнетитовых огнеупоров осуществляют в окислительной среде с избытком воздуха в топочной зоне 1,2—2; в зоне подогрева вследствие подсосов воздуха из поднагнеточного канала избыток воздуха может достигать двух-, трехкратного увеличения по отношению к теоретически необходимому расходу. Высокие температуры обжига требуют применения высокоогнеупорных материалов для кладки стен, сводов и топок, а также массивной футеровки и теплоизоляции под вагонеток. Большая длина зоны подогрева в печах для обжига огнеупоров и крупногабаритных изделий и соответствующее сопротивление садки обуславливают повышенное разрежение в печи и повышают требования к уплотнению в торцах вагонеток и в песочных затворах.

Подъем температуры в зоне подогрева регулируют расщедоточенным отбором дымовых газов через каналы в стенах печи непосредственно над полом 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 пластичных материалов и влаги в изделиях их нагревают с разным часовым подъемом температуры. Вагонетку с изделиями поддают 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 печного 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 отставшей части садки и существенно отличается от оптимального обжига печей, работающих в лабораторных условиях.

Исследовательские 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 характеристик изделий (их крупные габариты, недостаточная паропроницаемость капилляров и др.) подъем температуры в зоне подогрева производится по кривой 2 (рис. 36), для чего открывают пилеры 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 проходя через канал туннельной сушилки и зону подогрева печи. При небольшой влажности кирпича полусухого прессования (около 8%) в туннельной сушилке после удаления влаги температуру 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 сушилки обогревают горячим воздухом из зоны охлаждения туннельной печи и размещают на одной линии с печью или на пути возврата вагонеток.

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

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

зоны охлаждения туннельной печи дает возможность обеспечить сушилку теплоносителем заданных параметров, а топку горячим воздухом с помощью керамических нижесекторов.

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

При деформации нижних рядов кирпича или блоков садка на вагонетке разваливается, и в результате возникает простои в работе печи. Поэтому на заводах, производящих местные глины с узким интервалом температуры спекания, кирпич обжигают в козловых 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 печного канала с 3 м до $4,5-6 \text{ м}$, чем с избытком компенсируется уменьшение производительности печи от уменьшения высоты садки на вагонетках, перекрытие канала плоским сводом, замена тонкой, разноразмерной в стенах печи, на толку 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 теплообработки и увеличения объемов печных камер или каналов.

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

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

селей 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 оборачиваемости — свыше 100 циклов обжига. Зарубежные заводы тонкой керамики используют фасонный карборундовый припас, изготавливаемый на специализированных заводах применительно к запросам этой отрасли.

Обжиг изделий на этажерках (рис. 38) протекает при непосредственном теплообмене с газовой интенсивнее, чем в капсулах, 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

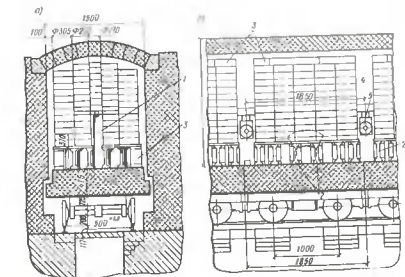


Рис. 37. Капсульная садка фарфора на вагонетку

а — вид с торца, в — вид сбоку, 1 — продольный канал, 2 — стойки, 3 — плиты, 4 — несущая конструкция, 5 — топка

навливают капсулы для загрузки мелкой электроизоляционной керамики или тарелок и блюдец, отличающихся низким коэффициентом использования печного объема при обжиге на этажерках.

В печах для обжига высококальциевых глазурованных изоляторов, хозяйственного и санитарного фарфора к процессу сжигания и джига 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 отчетливо подтверждается сопоставлением обжига крупноабразивных высококальциевых фарфоровых оболочек и фарфоровых чашек, изготавливаемых из близкого по составу и температурам обжига керамических масс.

Обжиг крупных изоляторов (оболочек высотой 2,5 м), освоены впервые в мировой практике в печи с размером канала $141 \times 2,5 \times 3,28$ м, спроектированной Всесоюзным научно-исследовательским институтом электрокерамики (ВНИИЭК), продолжается около 160 ч. Обжиг фарфоровых чашек (толщиной стенки 1,5—3 мм и недавно освоеной туннельной печи размером канала $28,4 \times 0,98$ м и односторонней загрузкой вагонеток продолжается 3—4 ч. Чашные и столовые сервизы (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 названной печи — неравномерность температуры 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 песочные затворы. В зависимости от длины зоны подогрева, а следовательно и необходимого разрежения, коэффициент избытка воздуха в продуктах горения возрастает до 2—3, а разность температур под сводом и у пода вагонетки до 200—300 °С. В этих условиях продолжительность нагрева изделий определяется нижней температурой с соответствующим увеличением продолжительности обжига в целом.

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

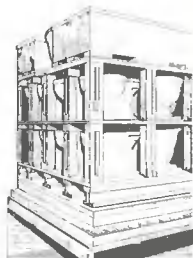


Рис. 38. Карборундовая этажерка для загрузки вагонеток санитарными фарфоровыми изделиями

равлических завес путем подачи горячего воздуха из зоны подогрева в канализированный под вагонеток или в промежуток между садкой над стыками смежных вагонеток; установкой в кладке стен вентиляторов из жароупорной стали для рециркуляции и перемешивания печных газов; устройства 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 промежуток 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 подтвердилась в печах для обжига изоляторов высотой до 2 и 2,5 м. В tunnelных печах размером $125 \times 2,4 \times 2,8$ м производили обжиг изоляторов высотой до 2 м по теплового и газовому режиму, показанному на рис. 39.

Туннельная печь размером $141,5 \times 2,5 \times 3,28$ м имеет входной и выходной вестибюли и печной канал длиной 135 м, вмещающий 54 вагонетки каждой длиной 2,5 м и соответственно 54 позиции, на которых выполняются и регулируются физико-химические и тепловые процессы. При обжиге крупногабаритных высоковольтных изоляторов наблюдаются потери (брак) изделий из-за недожога их у пода вагонеток 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. С 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 вагонеток, на позициях 1 и 2 печи устраивают воздушные завесы. Горячий воздух забирают из подгазовочного 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 регулируется шиберами 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 «прыщи» или

«углеродистый пузырь», а в производствах хозяйственного фарфора — еще и к нежелательной желтой 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 $950-1050^\circ\text{C}$.

Разграничение окислительной зоны от резко восстановительной, а затем от нейтральной или слабовосстановительной и стабилизация температуры на уровне около 1000°C осложняется на позиции 22, так как снизить температуру избытком воздуха и получить температурную площадку на позициях 17—22 без нарушения восстановительного режима невозможно. Поэтому для обеспечения оптимального газового режима на позиции 22 устроена паровая завеса (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.

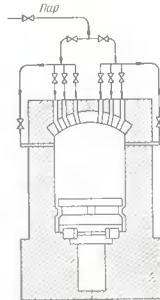


Рис. 41. Схема печи в конце восстановительной зоны

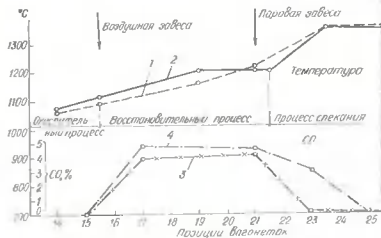


Рис. 42. Изменение температуры и содержания окиси углерода при включении и выключении паровой завесы

1 — температура в окислительной зоне; 2 — температура в восстановительной зоне; 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 завесы зоны подогрева.

Регулируемый прожекторный отбор горячего воздуха выполняется через каналы в стенах из нижней части печного канала на позициях 32—49 и из верхней части печного канала на позициях 12—13. Обжиг крупногабаритных оболочек при высоких требованиях к диэлектрическим характеристикам электрофарфора должны обеспечивать близкое к одинаковому 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 каналы. В зоне охлаждения на позициях печи 34—48 установлено восемь пар таких же вентиляторов (см. рис. 40), работающих с регулируемым подсосом холодного воздуха для равномерного охлаждения изоляторов по заданной кривой.

В современных конструкциях туннельных печей вентиляционную систему для регулирования гидравлического режима в подвешенном канале оборудуют в соответствии с режимом в печном канале, чем сокращается подсос 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 (141,3×2,5×3,28)

Длина печи, м	141,5
Ширина печного канала, м	2,5
Высота печного канала от пола до замка свода, м	3
Длина вагонетки, м	2,5
Число вагонеток в печи	54
То же, в зоне подогрева	18
» , в зоне обжига	10
» , в зоне охлаждения	26
Рабочий объем печи, м ³	830
Продолжительность обжига, ч	162

Малогабаритные туннельные печи используют в механизированных линиях для скоростного одноярусного 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 называют щелевыми.

При малой одноярусной загрузке вагонеток эти печи могут эффективно работать при продолжительности обжига 3—4 ч 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 печью на каркасе. В печном 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 шлангов 13, совершающей возвратно-поступательное движение. С верхних путей вагонетки опускаются на нижние, а после обжига поднимаются на верхние пути гидравлическими подъемниками 15, 16.

Чашки 7 или блюдца устанавливают на канализированном поду вагонетки, собранном из карборундовых илиг и стоек. Горелки или форсунки расположены между стойками на уровне каналов, в кото-

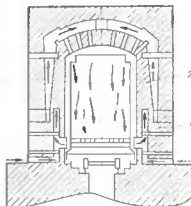


Рис. 43. Газовая завеса между окислительной и восстановительной зонами

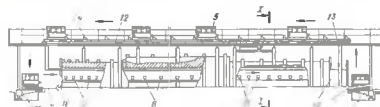
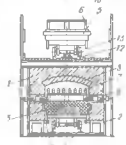


Рис. 44. Щелевая туннельная печь ПАС.
1 — печь; 2 — основание печи; 3 — канал; 4 — толкатель; 5 — вагонетка; 6 — вагонетка-подъемник; 7 — чашка; 8 — горелка; 9 — форсунка; 10 — отбор горячего воздуха; 11 — рельсы; 12 — отбор горячего воздуха; 13 — шланг с выстругом; 14, 15 — поды вагонетки; 16 — гидравлический; 17 — гидравлический; 18 — загрузочная камера; 19 — стойки корпуса



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

Вместо песчаных 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 пористым огнеупором. Изделия устанавливают непосредственно на платформы, без карборундового канализированного пода.

Техническая характеристика (проектная) печи ПАС.

Длина печного канала, м	28,4
Ширина печного канала, м	0,58
Используемая высота, м	0,28
Число вагонеток в печи, шт.	30
Число чашек на вагонетке при паренной загрузке, шт.	128
Продолжительность цикла обжига и охлаждения, ч	3
Производительность по загрузке чашек, шт/ч	1280
Максимальная температура обжига, °C	1380—1410
Расход угляного 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° C, 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 изделиям через ограждения из огнеупорных муфельных коробов или плит. Вследствие относительно невысокой теплопроводности огнеупорных материалов, применяемых для сооружения муфельных стен и коробов, 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 глазури или ее восстановление продуктами сжигания топлива и другие дефекты.

Муфельные печи преимущественно применяют для обжига тонкой керамики — фаянса, полуфарфора, низкотемпературного фарфора и художественного мягкого фарфора, облицовочных плиток, майолики, каменных изделий, покрытых цветными глазуриями, а также для закрепления красок после декорирования фарфора и фаянса. Далее даны описания 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 глазуриями, 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 ч 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 пустотелых элементов вдоль печи, между которыми проходят вагонетки с этажерками 5, 6 (рис. 45) для установок изделий. Четыре пустотелые плиты 1—4 с отверстиями прямоугольного сечения складываются в форме тратанши. Эти плиты сообщаются через отверстия с печным каналом и между собой. Дельтовидные муфельные элементы, сложенные из трубчатых 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 закладкой 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 отдаст часть тепла обжигаемой продукции и, по 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.

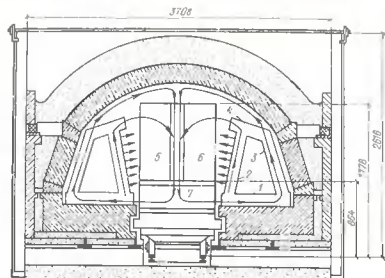


Рис. 45. Циркуляция газов в эвтектической мuffleной печи

1 — пустотелые штыри; 2 — углерод; 3 — канатизированный под вагонами

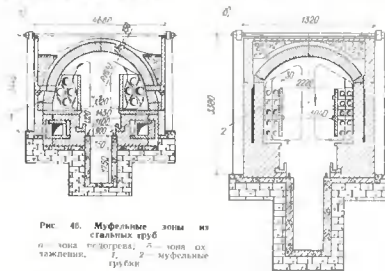


Рис. 46. Муфельные зоны из
стальных труб

n — зона перегрева, Δ — зона охлаждения, I , 2 — муфельные печи

Стоимость дельтовидных карбонидовых и муллитовых муфельных секций ввиду их довольно сложной конструкции высокая. Если принять для муфельной печи длиной 85 м длину зоны с карбонидовыми муфелями 20 м и длину зоны с муллитовыми муфелями 15 м, то стоимость огнеупорных муфелей 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 односторонними пустотелыми муфельными плитками или с пластинчатыми муфелями.

В туннельной печи с эллиптическим трубчатым модулем (рис. 47, а, б) камеры сжигания топлива ограничены со стороны печных вагонок стенкой из пустотелых плит, установленных на карбуродневных муллитовых коробках 2. Коробки имеют тонкие стенки со стороны топочных газов, подаваемых горелками 3, причем эти стенки открыты в сторону обжигаемых изделий. Поэтому раскаленные стенки этих коробок интенсивно излучают тепло под карбуродневные эжекторы 4 с изделиями через П-образные подставки 5.

Основная часть тепла от топочных газов передается обжигаемым изделиям путем излучения стенок трубчатых элементов 1 на садку изделий 4. Муфельные стенки из пустотелых 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 муфельных плит по направлению к своду печи, затем через садку изделий и между подставками 5 канализованного пода вагонетки и через отверстия в коробках плит 2 возвращается в каналы муфельных плит 1. Разность температур воздуха, нагреваемого стенками муфеля и охлаждаемого затем при прохождении через садку изделий, стимулирует потоки раскаленного воздуха в печном канале.

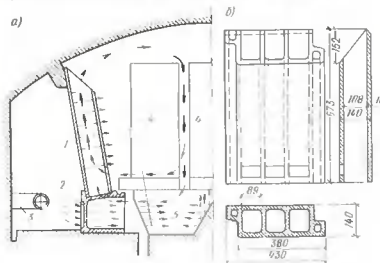


Рис. 17. Циркуляция газов в однорядных муфелях на пустотелых плитах с каналом циркуляции газов и подогревом печением. 1 — конструкция плиты

схематизированная структура и нагрева и излучением, δ — инструкция пинги

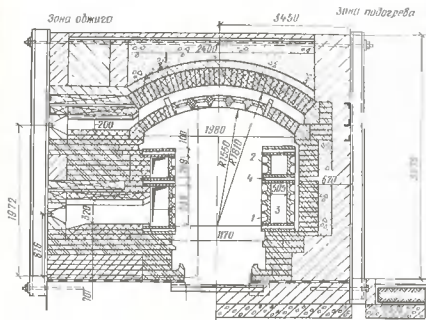


Рис. 48. Горизонтальные муфельные камеры из ребристых карборундовых плит в разрезе
1 — трубчатый элемент, 2 — поробка плиты, 3 — канал, 4 — горизонтальная плита

Обусловленный утили потоками конвективный теплообмен способствует выравниванию температуры обжига по сечению печного канала. Выравниванию температуры садки по высоте способствует излучение раскаленной коробки 2, передаваемое через канализованный под печной вагонетки. Печи с однорядным муфелем используют для обжига плиток с цветными глазурями. При однорядной загрузке санитарного фаянса с высотой садки до 0,75 м и шириной 1,35 м для снижения расхода карборунда массу карборундовых и муллитовых (в зоне подогрева) муфельных плит принимают примерно в три раза меньшую, чем плит в печах с дельтовидными муфелями, рассчитанными на высокую многоярусную садку изделий на вагонетках.

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

В печах с однорядными муфелями, построенных в США, для однорядной садки санитарных изделий не требуется этажерка из карборундовых плит. При однорядной садке производительность туннельной печи снижается и повышается удельные затраты на построение печного цеха. Вместе с тем резко снижается расход карборундового (передко дефицитного) и муллитового прироста и облекается загрузка вагонеток изделиями.

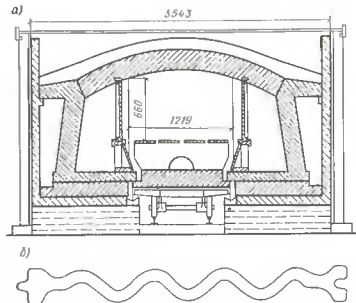


Рис. 49. Муфели из волнистых карборундовых плит
а — поперечный разрез муфельной зоны из волнистых плит, б — волнистая карборундовая плита

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 удешевления муфельных печей и упрощения конструкции муфелей были предложены менее сложные муфели с меньшим расходом карборунда, собранные из карборундовых плит: ребристых (рис. 48) или волнистых (рис. 49).

Карборундовая плита показана на рис. 49, а, б. Эти плиты, сопрягаемые друг с другом в схематически показанных замках, образуют сплошную стену. Вертикальное рифление муфельного фронта со стороны садки изделий облегчает движение горячего воздуха в восходящих потоках, вызывающих раскаленную поверхность муфельных плит, и способствует конвективному теплообмену. Технологические затруднения, которые возникают при изготовлении тонкостенных трубчатых элементов муфелей из тощих карборундовых шихт, 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 остановок на капитальный ремонт.

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: Х25Т, АХ2318Н, ХН78Т и др.

Трубчатые ролики из высокоугнеупорных материалов, например муллитовые, 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 капсулах 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 жидком топливе, природном газе и с электрообогревом.

Обжиг на природном газе или жидком топливе 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 электрообогревом.

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 одноярусной загрузке конвейера изделиями достигается более равномерная температура обжига, чем в печах с большим сечением канала. Благодаря этому преимуществу в конвейерных печах из цикла обжига исключается время, необходимое для выравнивания температуры по высоте печного канала. Поэтому в конвейерных

печах достигается существенное сокращение продолжительности обжига мелких и тонкостенных изделий. Продолжительность бескапельного 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 трехсменном режиме. В туннельных печах имеется на третью смену запас загруженного на вагонетках 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, огнеупорные и термостойкие плиты или капсулы — должны обладать надежностью в эксплуатации и обеспечивать длительную бесперебойную работу конвейерных печей во избежание дорогостоящих простоев 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 заводских 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 огнеупора с теплоизоляцией из шамотного 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 каркаса. 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 для замены деформированных роликов нарушают режим работы автоматической линии и снижают 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 трубчатые 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 выполняется 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 sortового выхода плиток дать существенный экономический эффект.

Учитывая расширение печного канала при прогреве 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 ширины, 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 — две горелки. Во всех секциях горелки размещены под роликовым конвейером. Давление газа у счетчика 0,1616 МПа, у горелок 0,1414 МПа. Плитки 150×150 мм подожены конвейером в четыре ряда. Проектная производительность печей при назначенных режимах первого и второго обжига составляет 250 000 м² в год.

Автоматические линии по производству плиток для полов отличаются от вышеописанной сушилки 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 организовывать и ней два конвейерных потока с двухъярусной конструкцией сушилок, печей и роликовых конвейеров. Двухъярусные автоматические линии работают эффективно в производстве стандартных, бесшершневых и кислотоупорных плиток с удвоенной производительностью по сравнению с одноярусными автоматическими линиями. Размеры, форма плиток и технология массового производства общепромышленной керамики более, чем в других производствах, 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 НИИ Стройкерамики и освоенных на заводах по производству строительных керамических изделий СССР.

Одноканальная муфельная конвейерная печь была спроектирована для обжига мазутом неглазурованных плиток, но заплата 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 цветных 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 омывании продуктами сжигания мазута.

Таблица 7. Характеристика роликовых песей открытого пламени с газовым отоплением

Характеристика	Печь «Бажан»									
	Облагодотопленных объектов					Двухэтажные объекты				
	Углубитель	Подогрев	Углубитель	Части 2	Однотопельный объект	Двухэтажные объекты	Части 2	Однотопельный объект	Двухэтажные объекты	Углубитель
Длина печи, м	22,4—24	39,6—42	33	56	33,6	42	60	27	27	27
Ширина печного канала в свету, м	0,9	0,9	1,15	1,3	0,9	0,9	1,15	1,1	1,1	1,1
Высота печного канала в зоне обжига от уровня пола до замка свода, м	0,62	0,62	0,73	0,75	0,62	0,62	0,73	0,65	0,65	0,65
Объем печного канала, м³	9,5—10	18—19	22	44	16	19	41	14,5	14,5	14,5
Число секций (всего)	8	14	11	18	12	15	20	9	9	9
В том числе в зонах подогрева обжига	2,5	4	3	6	4,5	8,5	10,5	3	3	3
охлаждения	1,5	3	2	4	2,5	1,5	2,6	1,5	1,5	1,5
Число роликов (всего)	4	7	6	8	52	5	7	4,5	4,5	4,5
В том числе из сплавов Cr20	320	560	510	740	480	810	1200	540	540	540
XH18H10T	40	60	80	100	60	108	180	60	60	60
X25T	140	270	—	—	200	216	—	—	—	—
0X23H18	—	—	200	300	—	—	300	300	300	300
XH78T	40	230	80	280	80	297	480	60	180	180
	100	—	150	—	140	189	240	120	—	—

Длина роликов, м	1,96	2,18	2,33	1,96	1,96	1,96	2,18	1,88	1,88
Диаметр роликов, мм	28	32	32	28	28	28	32	28	28
Шаг роликов в зонах, мм:	70,75	75	75	70	70	70	50	50	50
подогрева и охлаждения	70—60	60	75	70	70	70	50	50	50
обжига	B-21, B-28	B-21, B-28	B-24	B-21, B-28	B-21, B-28	B-21, B-28	B-21, B-28	B-21, B-28	B-21, B-28
Тип горелок	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	1,3—2,5
Производительность, горелок при нормальных условиях, м³/ч	25	40	46	47	56	123	31	31	31
Число горелок (всего)	20	40	46	41	50	71	21	21	21
В том числе, шт:	5	—	—	6	6	52	10	10	10
в зонах	250 000	250 000	500 000	200 000	200 000	400 000	200 000	200 000	200 000
Производительность, м³/год									

Ширина муфельного канала печи 0,9 м, а 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 карбундовых 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 борovu — в рекуператор и дымосос.

Количество и температура топочных газов регулируются количеством сжигаемого топлива в форсунках нижних и верхних топок. Пять нижних топок устроены в полу топочного канала с наклоном 30° в сторону зоны подогрева. Карбундовый 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 высокоглинозистого огнеупора с теплоизоляцией шамотным легковесом и пенидиатомитовым кирпичом. Ролики конвейера, как и в других печах, имеют звездочки для сжигания мазута, вихревые форсунки конструкции ВНИИтеплопроект с паровоздушным 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 шестерчатными насосами НШ-3 с приводами 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 печи подобного типа можно повысить при использовании в конвейере высокоогнеупорных роликов. Карбундовый муфель допускает повышение температуры до 1250°С. В модификации муфельной конвейерной печи можно организовать обжиг низкотемпературного фарфора на ледяниках. В этом варианте шаг и диаметр роликов соответственно увеличиваются и достигаются увеличение нагрузки на конвейер без снижения срока службы роликов. Недостатком конструкции печи является размещение нижних горелок под полом печи, что повлекло за собой устройство смотрового туннеля под печью, увеличение ее стоимости и некоторые неудобства обслуживания нижних форсунок. Не было нужды отказываться от принятого в проекте размещения верхних горелок в стенах печи.

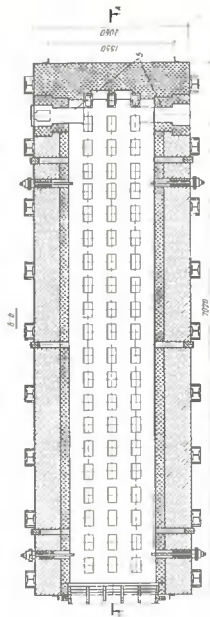
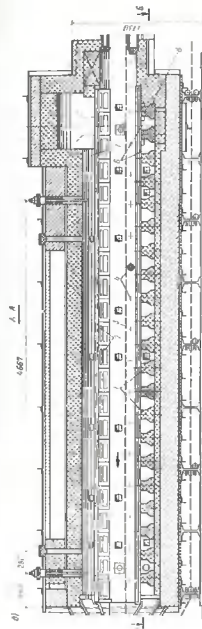
Конвейерные муфельные печи с ленточным конвейером. Такие печи применяют для предварительного обжига фарфоровой посуды и раскрашенной керамики при температуре до 800—900°С. Защита изделий от непосредственного воздействия пламени надежно обеспечивает в печном канале окислительную среду, необходимую для получения ярких рисунков, нанесенных керамическими красками.

Таблица 8. Характеристика муфельных роликовых печей

Характеристика	Печь для полного обжига облицовочных плиток	Печь для обжига плиток пазов
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 под до замка плит свода, м	0,412	0,473
Объем печного канала, м³	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:		
Cr20	100	60
X25T	395	210
OX23H18	263	400
XN176T	—	140
Длина роликов, м	1,26	1,88
Диаметр роликов, мм	28	28
Шаг роликов, мм	60	50
Топливо	Природный газ	Мазут
Тип горелок (форсунок)	B28	Вихревая, конструкция ВНИИтеплопроект
Производительность горелок (форсунок) при нормальных условиях, м³/ч	2—2,5	15
Число горелок или форсунок (всего)	61	11
В том числе:		
нижних	40	6
верхних	24	5
Производительность, м³/год	250 000	200 000

В печи предусмотрен канал длиной 19,55 м, шириной 1,09 м и высотой 0,22 м, в котором перемащаются изделия на сетчатой ленте конвейера из жароупорных сплавов, например из стали марки Х23Н13. Длина зоны подогрева 5,54 м. Зона обогрева в основном смонтирована из 12 чугунных блоков 1 с печным каналом 2 и дымовыми каналами 3 (рис. 50, а). Ленточным конвейером 4 с роликами 7 изделия подаются через зоны подогрева, обжига и охлаждения. Через каналы 3 на встречку изделиям подаются дымовые газы из зоны обжига, и в зоне подогрева через стенки блоков постепенно нагревают изделия и затем удаляются в атмосферу. Блоки изолированы в коробе 5 диатомитовой засыпкой и замыкаются у входной части коробки с шибром 6, высоту подъема которого устанавливают в соответствии с высотой изделий.

Рис. 50. Конусовая муфельная печь с ленточным транспортом
а — зона подогрева; 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 для 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 шамотным легковесом, а свод — диатомитовой засыпкой. Под муфельного канала, над которым конвейером 3 по роликам 4 на шамотных подставках 1 подаются изделия из зоны подогрева, выложен из шамотных или карбоновых плит (рис. 50, б).

В конце зоны обжига устроены газовые топки 5 с горелками ГНП-3 для природного газа. Пламя из двух нижних топок подаются 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 огнеупора класса А.

Зона охлаждения смонтирована из чугунных блоков подобно блокам зоны подогрева. Воздух, охлаждающий изделия, проходит по каналам чугунных блоков зоны и удаляется вентилятором в атмосферу или на сушку. Привод ленточного конвейера состоит из электромотора, клиноременной передачи, редуктора, зубчатой передачи и ведущего барабана. Натяжение сетчатой ленты, вытягивающейся 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	1,1
Ширина » » м	60
Скорость » » м/мин	0,021—0,4
Расход топлива в сжигаемом газе, МДж/ч	1460,5
Расход воздуха, м³/ч	10 000
Выделение воздуха перед горелкой, Па	2500
Мощность электродвигателя привода, кВт	0,5
Отдачу теплоты в щел около, МДж/ч	372

Мультиканальная 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 мультиканальными конвейерными электротепловыми той же фирмы эти печи имеют ряд преимуществ: изделия загреваются в одном конце печи и выгружаются в другом; поток обжигаемых плиток удобен и просто сочетается с предшествующими и последующими процессами механизирован-

ных и автоматизированных линий. В электротепловых вынужденные встречные передвижения плиток не позволяют рационально организовать производственные поточные линии на современных заводах. Использование газа вместо электричества дает большой экономический эффект.

В электротепловых температура обжига изделий лимитируется сроком службы нагревательных элементов (из каната и других сплавов) в пределах 1100—1200 °С, что ограничивает область применения этих печей. В газовых конвейерных печах при использовании высокоогнеупорных керамических роликов и высокоогнеупорной футеровки можно повысить температуру обжига и расширить область применения конвейерных печей при благоприятных технико-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 конструктивную линию обжига. В каналах огнеупорных плит, разделяющих роликовые конвейеры смежных ярусов печи, размещены (вместо нагревательных спиралей) камеры для сжигания подаваемой из микроторелок смеси газа с воздухом. Размещение горелок газопроводов в печи показано на рис. 51. Устройство свода, предназначенное для подачи газозооушной смеси в камеры сгорания, дано на рис. 52.

Печи имеют 12 каналов, размещенных в четырех ярусах, разделенных огнеупорными плитками, поэтому представляется возможным в известной мере регулировать температуру обжига в каждом ярусе, если в одной печи потребовалось бы сжигать изделия разного ассортимента. Четное число ярусов в электротепловых печах «Сити» обусловлено встречным движением изделий. В первой газовой печи были использованы основные узлы четырехъярусной электротепловой. При разработке новых газовых печей каналы можно размещать также в трех, пяти и семи ярусах в зависимости от необходимой производительности печи. Загрузка плиток в газовой печи на указанном заводе производится автоматически с полочных конвейеров. 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. Плитка обжигается 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 нецелесообразно вследствие их деформации.

Сплавы с высокой жароупорностью весьма дороги и дефицитны. Поэтому в зоне обжига целесообразно использовать керамически-

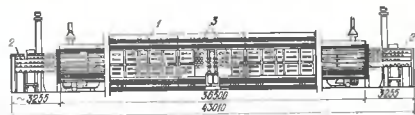
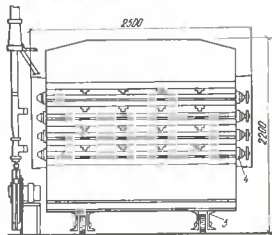


Рис. 53. Роликовая 12-канальная внепечная электропечь для обжига фарфоровых тарелок

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°C), а также глазурованных плиток (с температурой спекания $1050 - 1100^{\circ}\text{C}$), 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 мм (рис. 53). Каналы размещены в четырех ярусах по три канала в каждом ярусе. Изделия перемещаются в каналах роликовыми конвейерами на легких кордиритовых поддонах встречными потоками: в первом и третьем ярусах изделия движутся в одном направлении, а во втором и четвертом ярусах — в противоположном. Печь

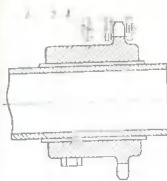


Рис. 54. Стальной ролик

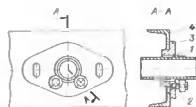


Рис. 55. Высокоглиноземистый трубчатый ролик

сборной конструкции, состоящей из семи обжигающих 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, позволяющих этим секциям 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 канала. Плиты не имеют отверстий для стержней, так как они предназначены для зон подогрева и охлаждения, где для нагрева изделий используется лишь тепло встречного охлаждаемого потока. Наружные ограждения секций выложены 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 обусловило длину поддонов, на которые загружают подаваемые в печь изделия. Поддоны изготовляют 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 поддон всегда опирается не менее чем на три ролика.

Тарелки и другие подобные фарфоровые изделия с высоким содержанием плавней, спекающиеся при температурах, не превышающих 1200°C , укладывают в один ряд на карборундовых подставках,

покрытых глиноземистой обмазкой. Для печей с невысокими температурами и скоростными режимами обжига термостойкие корднеритовые поддоны, отличающиеся в этих условиях высокой оборачиваемостью (свыше 100 циклов), оказались наиболее экономичными.

В зоне обжига в пазах футеровки уложены электронагреватели из хромферроалюминия (типа кантал), регулированием температуры которых определяется конечная температура обжига изделий и продолжительность процесса спекания фарфора при однократном обжиге или навалении глазури при двухкратном обжиге фарфора или фаянсовых плиток. Подогрев и охлаждение изделий происходит за счет рекуперации тепла охлаждаемых встречных потоков изделий и поддонов. В целях снижения до минимума потерь тепла сходящими газами из этих зон отбирается небольшое количество воздуха (необходимое лишь для удаления выделяющегося из изделий влаги).

Характерные для электропечей, работающих по принципу противотока, 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 (габаритная), м	43	43
Длина печного канала, м	36,5	36,5
Число каналов в четырех ярусах	12	12
Температура обжига, °С	До 1200	1050—1180
Продолжительность обжига, ч	8	3—3,5
Годовая производительность, тыс. м ²	—	Около 300
Установленная мощность для нагрева, кВт	450—500	450
Мощность привода, 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 облицовки 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 чистотой и размерами каналов, приспособленных к разным условиям загрузки обжигаемых изделий. Печи для первого обжига глазурованных фаянсовых плиток и плиток для полов изготов-

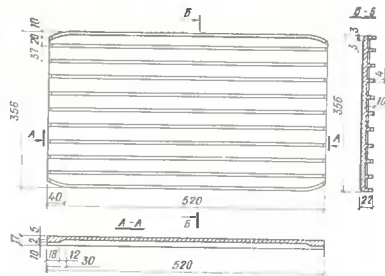


Рис. 56. Корднеритовый поддон электрической печи

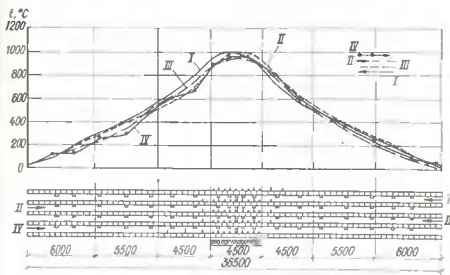


Рис. 57. Кривые температур (I—IV) обжига и охлаждения изделий в многоканальной электропечи

ляют с 36 или 48 каналами. Плитки укладывают стопками в зависимости от их толщины по 12—20 шт. на карбонидовые поддоны толщиной до 25 мм и перемещают в муфельных каналах печи по роликовому конвейеру. В зоне обжига муфельные каналы выложены из мушкетовых плит, которые имеют гнезда для укладки в них нагревателей из канала.

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 плавленой, 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 глазурованных плиток.

Второй обжиг плиток (глазурованных) производят на ребристых кордиритовых поддонах подобно вышеописанному обжигу тарелок. На одном поддоне укладывается шесть плиток размером 150 × 150 мм. Техническая характеристика конвейерной многоканальной 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 студии. 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 сжигании 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 (ванновые печи), периодические печи (ванновые 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, стекловолокна 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) пламенно-электрические печи; в них предусмотрен комбинированный нагрев.

По способу выделения теплоты электрические печи подразделяют на печи сопротивления (прямого и косвенного), дуговые печи, индукционные печи. Наиболее распространены печи сопротивления.

По устройству рабочей камеры печи могут быть горшковыми и ванновыми (непрерывного и периодического действия). Чаще всего применяют ванновые печи непрерывного действия как более экономичные и как печи, которые могут быть высокопроизводительными.

По направлению движения газов печи разделяют на горшковые и ванновые.

По направлению пламени горшковые печи могут быть с нижним (обращенным), верхним, нисходящим пламенем; ванновые печи — с поперечным, подковообразным, продольным пламенем; кроме того, с противоточным или прямоточным движением газов и шихты.

По способу использования тепла отходящих газов можно выделить печи с регенеративной системой подогрева воздуха или низкокалорийного газа, печи с recuperативной системой подогрева воздуха.

По способу разделения бассейна и пламенного пространства распространены печи с общим бассейном, разделенные лодками 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 отводомходящих газов в подду. Для варки оптических и технических стекол используют одно- и двухгоршковые печи, для варки цветных стекол, хрусталя — многогоршковые печи.

По способу использования теплоты отходящих газов применяют в основном регенеративные печи, иногда рекуперативные одnogоршковые.

Характеристика горшковых печей приведена 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, образую расплав стекломассы. Перемешивание стекломассы происходит в результате возникающих конвекционных потоков (неравномерный нагрев горшка по высоте). Для получения однородной стекломассы обычно (к концу периода провара) используют бурление или механическое перемешивание мешалками. Температура варки составляет 1480—1520° С. После получения однородной стекломассы происходит процесс студки стекла до температуры выработки.

Таблица 10. Характеристика горшковых печей

Печь	Изготавливаемые изделия	Число горшков	Подогрев печи (горшка)	Продолжительность варки, ч	Размеры подду				Кпд (тепловая), %
					длина или диаметр, м	ширина, м	высота, м	площадь, м ²	
Регенеративная: с верхним пламенем	Литое стекло	1—16	1—2	1—30	До 12	1,5—4	3—45	4—10	
	Хрусталь, сортовое, выдутое стекло	До 16	0,3—0,5	До 4—5	1—6	1—6	2—26	3—8	
	Оптическое стекло	1	1—1,6	1—1,5	2—2,5	1,4—1,6	3—4	2—4	
Рекуперативная с нижним, иногда восходящим пламенем	Техническое стекло	1—2	0,5—1	0,5—2	2—4	1,2—1,5	2,5—6	2—5	

Примечание. Полезная емкость горшка составляет 0,6—0,7 полной его емкости

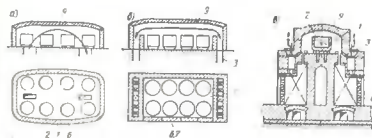


Рис. 58. Схемы горшковых печей

а — регенеративная с нижним (обращенным) пламенем, б — регенеративная с верхним пламенем, в — рекуперативная с восходящим пламенем, 1 — рабочая камера, 2 — горшки, 3 — горелки, 4 — рекуператоры, 5 — рекуператор, 6 — стены, 7 — окна вставки горшков, 8 — окна для выработки, 9 — свод

В период варки и осветления стекломассы топливо сжигают с минимальным коэффициентом избытка воздуха ($\alpha = 1,05—1,2$), а при выработке, в связи с уменьшением расхода газа, коэффициент избытка воздуха составляет $\alpha = 1,6—1,8$ (необходимость заполнения рабочего пространства печи газом). При этом температура поддерживается постоянная.

Выработку изделий из горшка производят вручную или методом литья. Схемы горшковых печей даны на рис. 58, а — в. Основным элементом горшковых печей является рабочая камера, которая по своей конфигурации может быть прямоугольной, овальной или круглой формы.

Применение той или иной формы рабочей камеры определяется производительностью, способом выработки и отоплением печи. При больших размерах печи, когда необходимо разместить много горшков (12—16), чаще всего используют прямоугольную или овальную форму рабочей камеры.

В одnogоршковых печах применяют круглую форму рабочей камеры, которая обеспечивает 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 подду печи. Применяют каменные или щелевые горелки. В подду также расположен горячий колоден на случай ухода стекломассы из горшка.

В горшковых печах с верхним пламенем применяют шахтные горелки, по горизонтальным каналам которых подают горячий

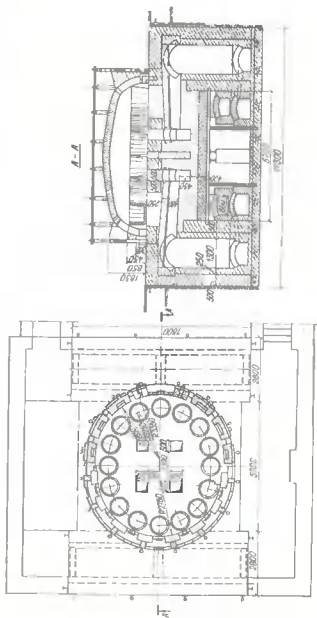


Рис. 60. Родовые гнезда

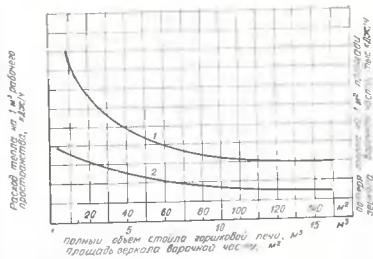


Рис. 61. Максимальный расход теплоты на горшковую печь (1) и потери теплоты анжой печью (2) в окружающую среду

пламенем 1,2—1,5 м; уклон простенков между окнами при ручной выработке должен быть 70°, причем внутрь печи. Расстояние от края горшка до края пода принимают 150—300 мм.

Поверхность сечения влетов горелок должно составлять 1,5–2,5% площади пода; скорость газов во влете 12–14 м/с; поверхность нагрева насадок регенераторов примерно 15–20 м² на 1 м³ 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 мода: $6 \text{ м}^2 \approx 75 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$; $10 \text{ м}^2 \approx 60 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$; $16 \text{ м}^2 \approx 45 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$; $20 \text{ м}^2 \approx 30 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$. для изготовления прессованного стекла $\approx 30 \cdot 10^3 - 50 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$.

§ 22. ВАННЫЕ ИЕЧИ

В промышленности для варки большинства стекол применяют ванны почти непрерывного действия, а для варки и выработки специальных стекол в небольших количествах — ванны печи периодического действия.

В ваннах печах варку стекла производят в бассейне, выложенном 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 ванн печей периодического действия применяют для варки светотехнических, клинкерных и спе-

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.

Один из недостатков печей периодического действия — повышенный износ брусьев бассейна из-за частых колебаний температуры

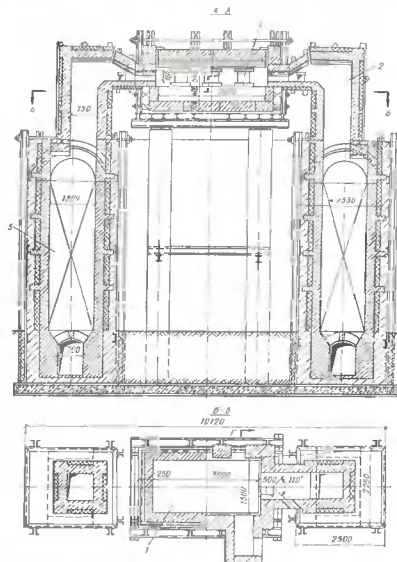


Рис. 62. Ванная печь периодического действия с поперечным направлением пламени: 1 — ванна, 2 — горелки, 3 — регенератор (или рис. 63) 4 — рекуператор, 4 — выработанные окна (эксплуатация дана для рис. 62, 63)

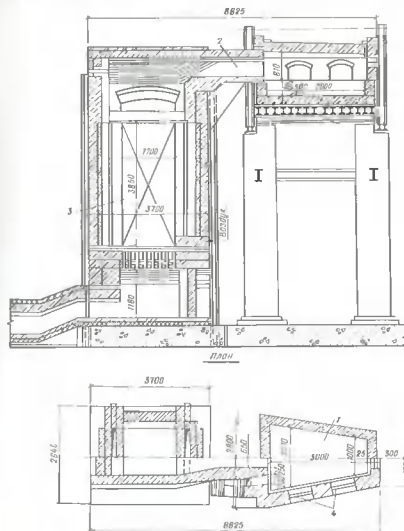


Рис. 63. Ванная печь периодического действия с подковообразным направлением пламени

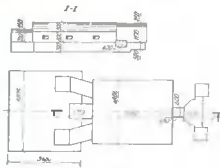


Рис. 65. Ванный печь с подковообразным направлением пламени и загрузочным карманом, расположенным с торца печи между горелками

реклами с торца печи. Движение газов в регенеративных 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

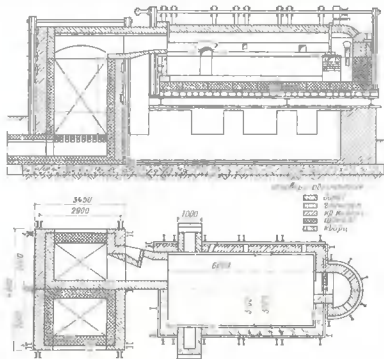


Рис. 66. Регенеративная ванная печь с подковообразным направлением пламени и загрузочными жаровнями, расположенными по продольной стороне печи

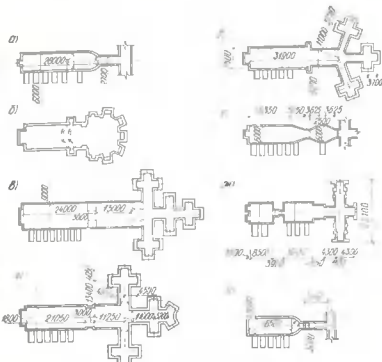


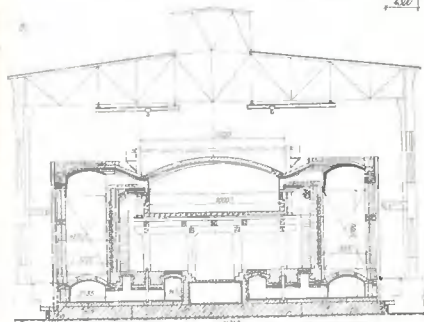
Рис. 67. Схемы ванных печей листового стекла
а — с общим бассейном, б, в — с заградительными лодками; г, д, е, ж — без разделения бассейнов, з, и — с разделенным бассейном

настоящее время используют главным образом ванные печи без конструктивного разделения бассейна в зоне стекломассы. Схемы ванных печей листового стекла приведены на рис. 67, а — и. Пламенное пространство печи разделяется экраном на граниче 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, электровакuumного, парфюмерной и аптекарской тары и др. Устройство протока позволяет уменьшить конвекционный поток (свести к нулю коэффициент потока) между ва-



© 1999 John Wiley & Sons, Inc.

Печь прямого нагрева представляет собой узкую и вытянутую в длину ванну, обогреваемую смесительными горелками, работаю-



а, б — незатупленный; в — приподнятый; г, д — затупленный; е, ж — незатупленный, флюсанный

сооружения высокая.

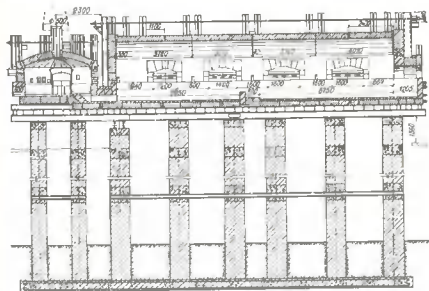


Рис. 70. Рецен-
ративная
ванна с про-
током

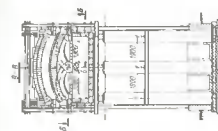
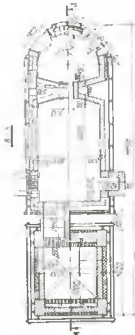
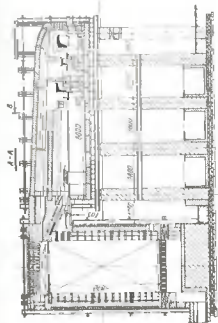


Рис. 71. Рецен-
ративная ванна с про-
током



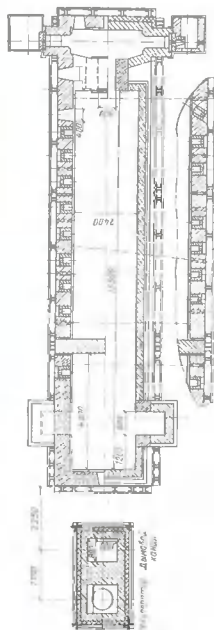


Рис. 72. Газовая печь с проходом прямого нагрева

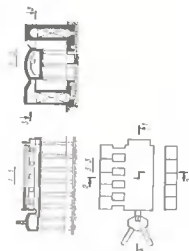


Рис. 73. Схема газовой печи с небольшим газопроводом бассейна

щими на холодном воздухе или на подогревом 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 нимте противотоком, что резко уменьшает агрессивное влияние лихитной 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 ($\alpha = 1,05$), возможность 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 гаубины бассейна (глубина бассейна обычно составляет 500—800 мм и зависит от состава стекла) и высоты верхнего строения. Печи прямого нагрева экономичны, 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 двухпроводных горелок полного смешивания (короткофакельных) шара 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

длина, м	Варочная часть		Производительность, т/сут	Температура газов отходящих, °С
	ширина, м	площадь, м ²		
6	1,2	7,2	5—9	16 500—13 500
8,4	1,2	10,1	7—12	12 500—17 600
9	1,8	16,2	9—20	13 100—12 150
11	1,8	19,8	12—30	13 850—12 150

Для использования теплоты отходящих газов за печами прямого нагрева, как правило, устанавливают радиационные рекуператоры, что позволяет снизить температуру отходящих газов до 650—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,

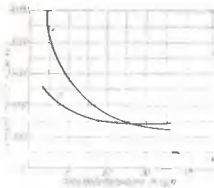


Рис. 74. Сравнение расхода топлива регенеративной печи и печи прямого нагрева

повысить коэффициент полезного действия ванн печей прямого нагрева до 50—55%.

Печи прямого нагрева могут быть использованы для варки специальных и цветных стекол, эмалей, хрусталя 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 стекломасса 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 схемы.

Прямоточные печи применяются для варки профильного, узорчатого, армированного и коврово-мозаичного стекла и других изделий. Прямоточные печи могут быть регенеративными или печами прямого нагрева с использованием теплоты отходящих газов в регенераторах. Глубина бассейна в зоне осветления 150—400 мм, в зо-

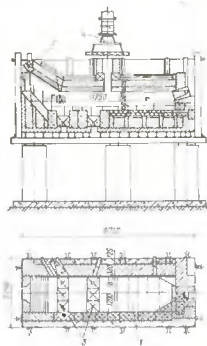


Рис. 75. Прямоточная печь
1 — варочный бассейн, 2 — горелки, 3 — отверстия для установки барботажных колод, 4 — отвод дымовых газов

не барботирования — 600 мм. Производительность прямоточных печей, работающих в промышленности, составляет до 20 т/сут.

За последнее 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 1780°С); использования эффекта направленного теплообмена; расширения впадов 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 протоком и в зоне варки; установки мешалок для повышения однородности стекломассы; создания независимого теплового режима в варочных бассейнах (отделения их от варочного бассейна по плазмному пространству); использования для клади печей электроуправляемых огнеуловов и других усовершенствований.

Внедренные в промышленность печи прямого нагрева и прямоточные печи экономичны по расходу топлива, имеют низкую стоимость, требуют меньших производственных площадей для их размещения. Широкое распространение для варки специальных технических стекол и хрусталя получили электростекловаренные печи. Экономичность печей достигается также за счет использования тепловой изоляции регенераторов, горелок, свода и стен варочного бассейна, уплотнения регенеративной системы, внедрения автоматического регулирования работы печи.

При разработке новых конструкций стекловаренных печей для рациональной организации варки стекла и интенсификации процессов стекловарения необходимо обратить особое внимание на подготовку шихты для ускорения теплообмена, увеличение соприкосновения шихты с нагревающим газом, предварительный подогрев шихты; улучшение теплообмена между факелом и стекломассой с целью увеличения скорости протекания реакции; улучшение перемешивания стекломассы и ее гомогенизацию; ускорение процесса осветления; наиболее эффективное использование топлива, минимальный удельный расход теплоты; применение огнеуловов, которые устойчивы к раздвиганию стекломассой и шихтой.

Основным направлением в предлагаемых новых конструкциях стекловаренных печей является варка стекла в тонком слое или в вращающемся состоянии, использование различных установок предварительной тепловой обработки шихты, осветление стекломассы в тонком слое.

Ниже даны некоторые предложения по новым конструкциям стекловаренных печей непрерывного действия.

1. Вращающиеся печи. Печь конструкции Цитова (рис. 76, а) с рабочей камерой, представляющей собой вращающийся барабан

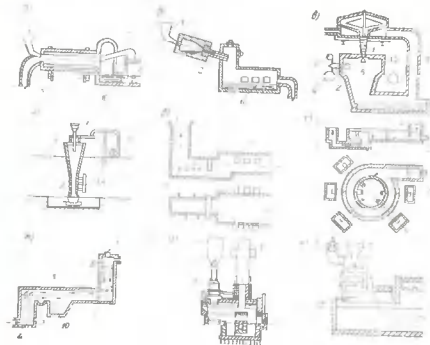


Рис. 78. Схемы новых конструкций печей

1 — вращающаяся печь; 2 — печь с вращающейся форкамерой; 3 — печь с вращающимся барабаном; 4 — печь с вращающимся барабаном; 5 — печь с вращающимся барабаном; 6 — печь с вращающимся барабаном; 7 — печь с вращающимся барабаном; 8 — печь с вращающимся барабаном; 9 — печь с вращающимся барабаном; 10 — печь с вращающимся барабаном.

(скорость вращения 60—100 мин⁻¹), в который подается тонкоизмельченная шихта противотоком по отношению к дымовым газам. При вращении барабана шихта и стекломасса покрывают футеровку печи равномерным тонким слоем. Сваренная стекломасса стекает в бассейн, из которого происходит выработка.

В печи конструкции Боссе (рис. 76, б) шихта подается во вращающийся форкамеру, которая имеет малый угол наклона, благодаря чему шихта не проваливается в бассейн печи. Указанные конструкции не получили распространения из-за сильного износа футеровки и низкого качества получаемого стекла.

2. Печи для варки стекла во взвешенном состоянии. Фергюссон был предложена конструкция печи (рис. 76, в), в которой предусматривались плавление шихты во взвешенном состоянии и доварка стекла на стенках шахты печи. Проведенные опыты показали, что футеровка печи сильно изнашивалась, стекломасса была нечистородна и загрязнена.

И. И. Кипайгородский, Д. Б. Гинзбург и В. П. Суровцев предложили шихту вводить в печь (рис. 76, г) сверху, а газ и воздух — снизу, причем таким образом, чтобы шихта находилась во взвешенном состоянии и не оседала на стенки печи. Проведенные испытания показали, что состав расплава неоднороден и наблюдался большой унос шихты с отходящими газами.

3. Печь с погружными горелками (рис. 76, д). Печь предусматривает применение предварительно подготовленной шихты, а для улучшения теплообмена между факелом и стекломассой — перемешивание расплава с помощью газов сгорания.

Печь состоит из варочного бассейна, в котором установлены погружные горелки. Над бассейном размещается теплообменная колонка, где происходит предварительный подогрев шихты дымовыми газами, движущимися противотоком из варочной зоны. Осветление 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 поперечное сечение. Предварительно спрессованная шихта подается через теплообменную колонку 1, где нагревается. Печь снабжена погружными горелками 2. Проведенные опыты показали возможность получения однородной стекломассы высокого качества.

5. Циклонно-каскадная печь (рис. 76, и). Предложенная Д. Б. Гинзбургом, М. А. Матвеевым и И. И. Кулиным конструкция печи позволяет развивать поверхность зоны варки и достигать интенсивного соприкосновения газов и шихты.

Печь работает по следующей схеме: питатель шихты 1 подает шихту из бункера в циклон 7. Топливо и подогретый воздух подводится в циклон тангентально. Проваренная стекломасса из циклона стекает на первую осветлительную ступень, затем на вторую, далее в бассейн-кошлынок. Факел пламени направлен на осветлительные ступени. Отходящие газы из зон варки и осветления поступают в радиационный рекуператор 5, в котором подогревается воздух, идущий на сжигание газа.

6. Печь с каскадной теплообменной колонной (рис. 76, ж). Шихта из бункера поступает в каскадную теплообменник противотоком по направлению движения дымовых газов. Шихта сыпется на горизонтальные плиты, омываемые дымовыми газами. Предварительно оплавленная шихта поступает в варочную зону, а затем в зону осветления.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВАННЫХ ПЕЧЕЙ

Рабочая камера состоит из варочного бассейна (зоны варки и дегазации), выработочного бассейна (зоны студии 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 выкладывают из огнеупорного материала насухо вибрируя. Бассейн располагается на самостоятельном фундаменте.

Для уменьшения распадаения кладки бассейна ее делают из крупных фасонных брусьев. Основным материалом для кладки варочного бассейна большинства печей являются электроплавящиеся баделито-корундовые огнеупоры (бакор-33, бакор-41, ЦАК и др.). Дно печи обычно выкладывают из крупных шамотных брусьев (1000 × 400 × 300 мм), сверху футеруют их бакоровой плиткой (600 × 600 × 300 мм). Толщина плитки 75—120 мм.

Для кладки выработочной части рекомендуется электроплавящийся корундовый огнеупор.

При кладке бассейна необходимо предусмотреть возможность перемещения брусьев во время их разогрева. Чтобы уменьшить число горизонтальных швов 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, уложенное на полочные металлические балки.

Пламенное пространство над бассейном ограничено главным сводом и стенами, которые, как правило, имеют самостоятельное крепление. В продольных стенах пламенного пространства при поперечном направлении пламени и в торцевой стене при подковообразном направлении пламени предусмотрены влеты горелок для подачи газовойдушной смеси, отводы 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 выкладывают из огнеупорных материалов (динаса, электроплавящихся и др.), толщину стен принимают 380—500 мм. Главный свод печи сооружают из динасовых фасонных брусьев, толщину свода предусматривают в зависимости от ширины пролетов 300—400 мм. Кладку свода и стен ведут на растворе с минимальной толщиной швов (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 выводов заделывают.

Стены и главный свод пламенного пространства подвешивают на металлических колодных (вертикальных колоннах печи), распор свода воспринимаются связями.

Опорные прогоны подвесных стен (лафеты) и главного свода опирают на крашнейши, которые крепят к стойкам печи. Стойки печи также воспринимают давление стекломассы в печи.

Для устойчивости главного свода в печах с поперечным направлением пламени стрелы подъема свода принимают 1,8—1,9 пролета,

в печах с подковообразным направлением пламени (горелки расположены в торцевой стене) — 1,7—1,8 пролета.

Загрузка шихты. В большинстве печей непрерывного действия загрузка шихты механизирована. Порошкообразную шихту и бой загружают через отверстия в торцевой стене или в карман печи. Карман печи располагают у торцевой стены в печах с поперечным направлением пламени и по продольной стене (боковой) в печах с подковообразным направлением пламени. Обычно карман печи представляет собой выступ бассейна, ширина которого зависит от производительности и ширины печи. Схема загрузочных устройств печи представлена на рис. 77, а—ж.

Для загрузки шихты и бой используют шнековые, плунжерные, 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 шихтой вперемежку с дробленным боем в виде мелких куч, которая позволяет увеличить площадь теплообмена и интенсивно прогреться шихте сверху и снизу. Для уменьшения потерь теплоты, улучшения условий обслуживания загрузчиков, исключения пыления шихты загрузочные карманы перекрывают. Иногда во избежание пыления шихту и бой подвешивают перед варительной термической обработкой, которая превращает ее во фритту. 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 уровнем.

В последние годы нашли широкое применение роторные загрузчики, которые подают шихту на непрерывный слой бой. В печах малых размеров наибольшее распространение получили плунжерные и шнековые загрузчики.

Горелки ваннйх 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 ваннйх регенеративных печей, отапливаемых выгокалорийным топливом, представляют собой каналы, по которым топливо подводит с торца или снизу под углом в поток воздуха, поступающий от генераторов. Топливо подводит в камеру предварительного смешивания с торца, сбоку в «щечках» или снизу горелки (рис. 78, а—г). Для улучшения смешивания газа и воздуха и направления факела на поверхность стекломассы уклон верхнего сво-

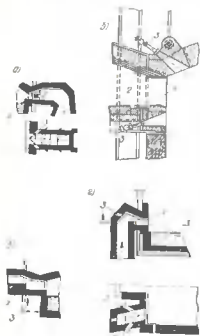


Рис. 78. Схема горелок газовых печей:
а — шахтная с боковым вводом газа;
б — с входом в верхнюю часть печи;
в — с входом газа в ступень горелки;
г — с входом газа в топку и бойлер;
д — с входом газа в топку и бойлер;
е — с входом газа в топку и бойлер;
ж — с входом газа в топку и бойлер;
з — с входом газа в топку и бойлер;
и — с входом газа в топку и бойлер;
к — с входом газа в топку и бойлер;
л — с входом газа в топку и бойлер;
м — с входом газа в топку и бойлер;
н — с входом газа в топку и бойлер;
о — с входом газа в топку и бойлер;
п — с входом газа в топку и бойлер;
р — с входом газа в топку и бойлер;
с — с входом газа в топку и бойлер;
т — с входом газа в топку и бойлер;
у — с входом газа в топку и бойлер;
ф — с входом газа в топку и бойлер;
х — с входом газа в топку и бойлер;
ц — с входом газа в топку и бойлер;
ч — с входом газа в топку и бойлер;
ш — с входом газа в топку и бойлер;
щ — с входом газа в топку и бойлер;
ъ — с входом газа в топку и бойлер;
ы — с входом газа в топку и бойлер;
э — с входом газа в топку и бойлер;
ю — с входом газа в топку и бойлер;
я — с входом газа в топку и бойлер;

который давно применяется в горючих и газовых печах периодического действия. Бурление стекломассы позволяет прогревать ее глубинные слои, принудительно перемешивая их, удлинить время пребывания стекломассы в зоне варки, что в конечном счете приводит к росту производительности печей и повышению качества стекла.

Бурление стекломассы радикально изменяет характер и скорости проток, вовлекая в циркуляцию весь объем стекломассы. По данным исследования Д. С. Велева [6], при наличии бурления по обе стороны восходящих пузырей возникают два вращающихся вала (рис. 82, а, б): один направлен к зоне варки, другой — к зоне студки.

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. Пчелякова [6], М. А. Панковой и др., сопла следует располагать в один-два ряда. В печах с поперечным направлением пламени и двухциклового циркуляцией рекомендуется первый ряд сопел располагать в месте температурного максимума по стекломас-

каналов при бездочном вытягивании принимать 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 бурления стекломассы. Наиболее важные процессы стекловарения — осветление и гомогенизация, так как от их завершения зависят 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 осветления; растягивание зоны варки и осветления; бурление стекломассы — механическое перемешивание; использование мешалок.

В последнее время для ускорения процесса осветления и гомогенизации стекломассы и варочных печей непрерывного действия широко распространяется метод искусственного бурления стекломассы,

се. В проточных печах сопла располагают на расстоянии, составляющем 25—30% длины бассейна (от протока), т. е. в зоне чистого зеркала.

Для повышения варочной способности зоны варки сопла располагают в районе шихтовой пены. Расстояние 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. Расход газа составляет 1,2—2,5 м³/ч, давление на соплах 0,2·10⁵—0,6·10⁵ Н/м², частота выхода пузырей в 1 мин не менее 15—20 и не более 50—60 в зависимости от вида стекломассы.

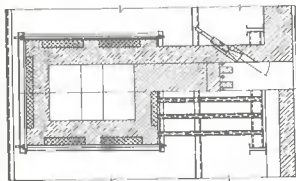
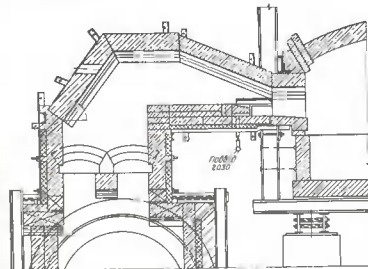
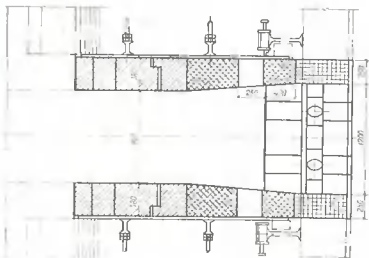
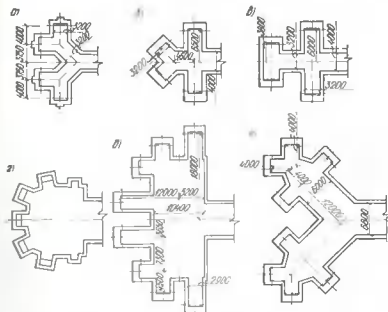


Рис. 79. Конструктивная схема горелки с подводом газа в ступень горелки

This architectural section drawing illustrates the internal structure of a building. It features a series of horizontal beams supported by vertical columns. The roofline is shown with various slopes and levels, indicating different floor heights or roof sections. Shaded areas represent solid construction elements, while white spaces indicate open volumes or air gaps. The drawing includes numerous dimension lines and numerical values, such as 70, 1250, 228, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.



162



а, б, в — для трех и четырех машин; 2, 3, 4 — непосредственным питанием машин

Стекло	Давление при раско- ле в одну волну, Н/см ²	Число трещин на попереч- ном 1 мм	Диаметр трещин, мм
Темно-зеленое	$(0,2 - 0,6) \cdot 10^8$	15 - 20	≈ 150
Полубелое	$(0,4 - 0,5) \cdot 10^8$	50 - 60	200 - 250
Бесцветное нейтральное	$(0,25 - 0,3) \cdot 10^8$	35 - 40	
Бесцветное щелочное	$(0,2 - 0,5) \cdot 10^8$	20 -	100 - 150
Бесцветно-малозеленое	$1,4 - 2,5 \cdot 10^7$	-	
Бесцветное барьерное	$(0,3 - 0,1) \cdot 10^8$	10 -	150 - 200

Тип печи выбирается в зависимости от состава стекла, вида и ассортимента вырабатываемых изделий, заданной производительности печи, способа выработки и вида топлива. Площадь варочного бассейна (отоплавляемой части) варочных печей непрерывного действия определяют на основании их общей производительности по стекломассе и удельному съему стекломассы.

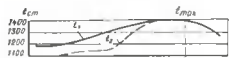
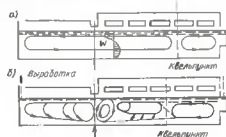


Рис. 82. Конвективные потоки стекломассы
а — без бурления; б — с бурлением (кривые температур t_1 — без бурления; t_2 — с бурлением)



а — водоохлаждаемое, б — с металлическим кожухом; в — с оловянно-родиевым наконечником; г — жаростойкое с корундовой рабочей частью, д — металлическое жаростойкое

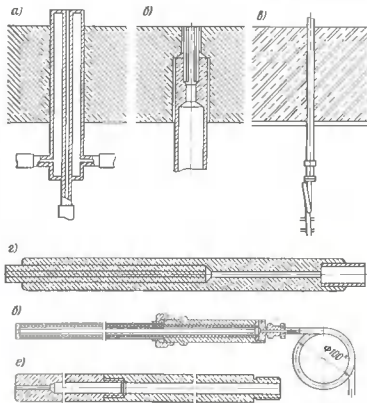


Рис. 11. Принципиальная схема устройства бурления
1 — сопла; 2 — коллектор; 3 — привод

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 расход, т/(м ² ·сут)	0	0,35	0,7	1,05	1,5	2	3

Площадь отапливаемой части печи (зоны варки и освещения в м²) определяют по формуле

где G — производительность печи по стекломассе, кг/сут; q_n — удельный расход стекломассы $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

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 студучной и выработочной частей бассейна зависят от конструкции печи, способа выработки и схемы стекломассы. Для печей листового стекла площадь зеркала студучной 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 шихты, 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 гомогенизация протекают с достаточной скоростью (1470—1530° С).

Длина и ширина печей зависят от площади варочного бассейна и от организации процесса горения. Минимальную ширину печей с поперечным 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 поперечным направлением пламени определяют расстоянием от уровня бруса бассейна до верха толстого 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 $1,8 \cdot 10^{-3}$ 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 [кДж/(м²·ч)] для регенеративных и рекуперативных печей можно определить по формуле Л. Б. Гинзбурга [11]

$$Q = (Pn - Wk_2) (1 - \alpha_1 k_3) \quad (47)$$

где P — сьем стекломассы, кг/м²; n — расход теплоты на получение стекломассы при температуре выработки, кДж/кг; k_2 — доля теплоты, теряемой отходящими газами; принимают $k_2 k_3 = 0,25$; k_3 — коэффициент, характери-

зующий изменение потерь теплоты в окружающую среду с изменением температуры в печи (при температуре 1400° С $k_2 = 1$), W — потери теплоты в окружающую среду, кДж/(м²·ч)

Значения n , k_2 , k_3 определяют по рис. 85, значение W — по рис. 61. Полный расход теплоты на печь Q_n , кДж/ч,

$$Q_n = QF \quad (48)$$

где F — площадь отопляемой части печи, м².

Для печей прямого нагрева общее потребление теплоты Q , кДж/сут, может быть определено по эмпирической формуле

$$Q = [(13,2 - 1,77T) + 10,77] 10^6 \quad (49)$$

где F — площадь варочного бассейна, м², T — сьем стекла, т/сут.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

Температура газов, выходящих из рабочего пространства печи, составляет 1500—1600° С. 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 и 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 низкотемпературный генераторный газ подогреваются до температуры 1000—1200° С.

Регенераторы представляют собой камеры, внутри которых имеется насадка, выложенная из кирпича. Схема регенераторов представлена на рис. 86, а—г. Различают вертикальные и горизонтальные регенераторы. В вертикальных движение дымовых газов происходит сверху вниз, воздуха — снизу вверх (рис. 86, а—г), в горизонтальных — движение газов горизонтальное (рис. 86, д, 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.

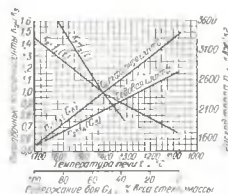


Рис. 85. График для определения n , k_2 , k_3

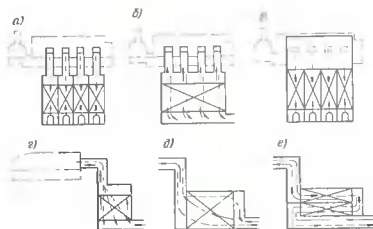


Рис. 86. Схемы регенераторов

вертикальный: а — секционный, б — одноходовой, в — секционный шапчатого типа; г — для печи с подковообразным пламенем; горизонтальный: д — одноходовой, е — 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 насадку без нарушения работы печи, лучше оmyваются газами, кроме того, можно создавать более высокую температуру подогрева воздуха (на 100—150° С).

В ваннах пекчах с поперечным направлением пламени регенераторы располагают вдоль продольных стен, в пекчах 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 кирпичей 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 насадки составляет 55—60% объема камер. В ваннах пекчах высота насадки вертикальных регенераторов составляет 5—8 м, ширина — до 4 м, в горшковых пекчах 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 теплопередачи насадки, поверхности нагрева, температуры дымовых

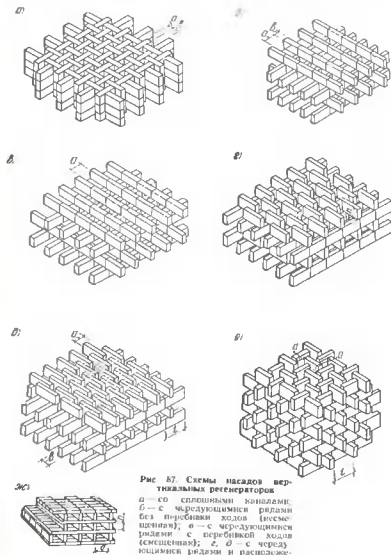


Рис. 87. Схемы насадок вертикальных регенераторов

а — со сплошными каналами; б — с чередующимися рядами; в — с чередующимися рядами с перебивкой; г, д — с чередующимися рядами и расположением кирпичей вразбежку; е — с чередующимися рядами и расположением кирпичей вразбежку; ж — с чередующимися рядами и расположением кирпичей вразбежку; з — с чередующимися рядами и расположением кирпичей вразбежку; и — с чередующимися рядами и расположением кирпичей вразбежку; к — с чередующимися рядами и расположением кирпичей вразбежку

Температуру дымовых газов на выходе из регенератора определяют из уравнения теплового баланса.

Определив поверхность нагрева насадки регенератора, определяем объем насадки, м^3 :

$$V_n = F/l,$$

где l — поверхность нагрева 1 м^3 насадки, м^2 .

В соответствии с расположением горелок выбирают длину регенератора и соответственно ширину. Для валяных печей поверхность нагрева насадки составляет $20\text{--}30 \text{ м}^2$, или $1,1\text{--}1,8 \text{ м}^2$ на 1 м^2 варочной части.

Рекуператоры. В связи с высокой температурой отходящих газов в печах ($1400\text{--}1500^\circ\text{C}$) для подогрева воздуха применяют керамические противоточные рекуператоры, допускающие подогрев до $800\text{--}1000^\circ\text{C}$. На печах прямого нагрева применяют радиационные рекуператоры, допускающие подогрев воздуха до $400\text{--}500^\circ\text{C}$.

Керамические рекуператоры. Их кладку осуществляют из фасонных трубчатых элементов. При температуре стенки 1400°C используют шамотные фасонные элементы, при температуре 1500°C и выше — шамотно-карборундовые или высокоглиноземистые.

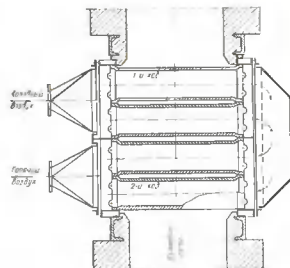
В промышленности в основном применяют вертикальное расположение трубчатых элементов.

На рис. 88, а, б приведен керамический рекуператор, в котором дымовые газы движутся сверху вниз внутри трубчатых элементов, а подогреваемый воздух омывает эти элементы. Трубчатые элементы восьминерного сечения соединяются между собой специальными вкладышами (колышками). Для образования каналов, по которым должен переноситься воздух, между колышками вставляют промежуточные фасонные перегородки. При кладке керамических рекуператоров особое внимание уделяется уплотнению стыков элементов с целью уменьшения подсоса воздуха к дымовым газам. Швы промазывают шамотно-бокситовой замазкой на жидком стекле.

Удельная поверхность керамических рекуператоров составляет $6\text{--}12 \text{ м}^2/\text{м}^3$; коэффициент теплопередачи — $2\text{--}5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, скорость дымовых газов в рекуператоре — $0,3\text{--}1 \text{ м/с}$, скорость воздуха — $1\text{--}2 \text{ м/с}$.

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 $700\text{--}1000^\circ\text{C}$. Элементом игольчатого рекуператора является игольчатая чугунная труба длиной $880\text{--}1640 \text{ мм}$. Коэффициент теплоотдачи составляет $75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Рекуператор типа «Термоблок» состоит из гладких стальных труб диаметром $12\text{--}19 \text{ мм}$, стенки которых защищены чугунной броней. Коэффициент теплоотдачи составляет $10\text{--}25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Рис. 89. Двухходовой игольчатый рекуператор



Для печей прямого нагрева с температурой отходящих газов $1000\text{--}1200^\circ\text{C}$ 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 $20\text{--}30 \text{ м/с}$. Температура подогрева воздуха при этом составляет $350\text{--}400^\circ\text{C}$.

Расчет рекуператоров. Для расчета рекуператора пользуются уравнением теплообмена

$$Q = K F \Delta t, \quad (52)$$

где Q — количество теплоты, передаваемой от дымовых газов воздуху, Вт ; K — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; F — поверхность нагрева рекуператора, м^2 ; Δt — средняя разность температур между дымовыми газами и воздухом, $^\circ\text{C}$.

Из уравнения определяют поверхность нагрева $F = Q / K \Delta t$. Коэффициент теплопередачи K определяют по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^d} \cdot \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha^a}}, \quad (53)$$

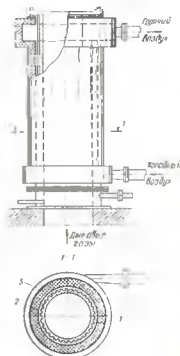


Рис. 90. Радиационный рекуператор
1 — внутренняя труба; 2 — наружная труба; 3 — теплоизоляция

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^A учитывают излучение и конвекцию

$$\alpha^A = \alpha_K^A + \alpha_n^A, \quad (54)$$

где α_K^A — коэффициент теплоотдачи конвекцией от дымовых газов к стенке, Вт/(м² · °С); α_n^A — коэффициент теплоотдачи излучением от дымовых газов к стенке, Вт/(м² · °С).

Для металлических рекуператоров можно пренебречь величиной $\delta\lambda$, тогда

$$K = \alpha^A \alpha^B / (\alpha^A + \alpha^B). \quad (55)$$

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 стенки, см; K — коэффициент теплопередачи на проверяемом участке, Вт/(м² · °С).

Котлы-утилизаторы. Температура отходящих газов за переводными клапанами регенеративных печей или за рекуператором составляет 380–400 °С, их энтальпия — 20–30% вводимого тепла. Особо высокая температура отходящих газов у печей прямого нагрева (1100–1200 °С).

Для использования теплоты отходящих газов за печами устанавливают котлы-утилизаторы или контактные водоподогреватели. Котлы-утилизаторы или водоподогреватели используют не менее 50%

теплоты отходящих газов. Температура отходящих газов после котлов-утилизаторов составляет 150–170° С.

Энтальпия отходящих газов, поступающих в теплоиспользующую установку, может быть определена следующим образом:

$$I_F = V_F c_F t_F, \quad (57)$$

где I_F — энтальпия отходящих газов, кДж/ч; V_F — объем газов, поступающих в теплоиспользующую установку, м³/ч; c_F — средняя приведенная теплоемкость газов, кДж/(м³ · °С).

Для ориентировочных расчетов может быть использовано выражение

$$c_F = 1,33 + 0,00016 t_F. \quad (58)$$

Здесь t_F — температура газов перед теплоиспользующей установкой, °С.

Схема установки котлов-утилизаторов за регенеративными печами представлена на рис. 91.

Котлы-утилизаторы устанавливаются на байпасе. Система газопроводов 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 сжатым 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 т пара 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 незначительные 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 вырабатывать стекло высокого качества. В электропечех допускается развитие высоких температур собственно в стекломассе без увеличения температуры кладки.

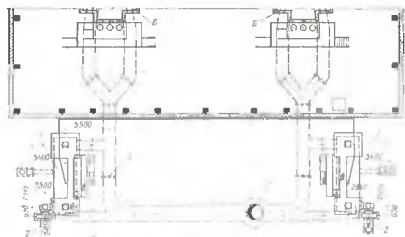


Рис. 91. Схема установки котлов-утилизаторов за регенеративными печами
1 — печь; 2 — рекуператор; 3 — газопровод; 4 — котлы-утилизаторы; 5 — вода; 6 — пар; 7 — обдув; 8 — обдув

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 одноторшковые 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, тугоплавких 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, стеклотекстолита. Для нагревателей используют платиновые сплавы, вольфрам и графит.

В печах прямого действия тепло выделяется непосредственно в стекломассе. Электростекловаренные печи промышленного назначения являются печами прямого действия (рис. 92, а — в).

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].

1. 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.

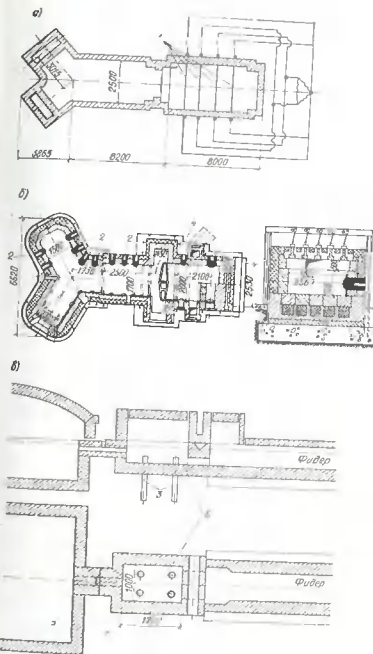


Рис. 92. Электростекловаренные печи прямого действия
а — для листового стекла (печь Бореля); б — печь с охлаждающими стальными электродами; в — печь с охлаждающей ячейкой; электродами: 1 — графитовые, 2 — стальные, 3 — молибденовые; 4 — ванна; 5 — варочная часть, 6 — осветлительная ячейка

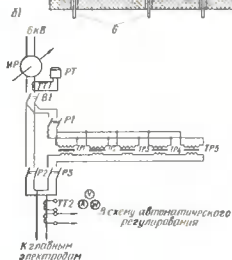
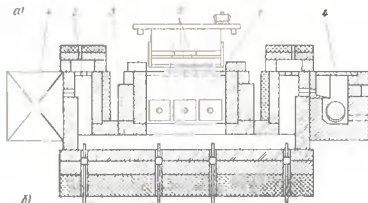


Рис. 92. Принципиальная схема плавки электродами промышленной электростекловарочной печи

1 — варочная часть, 2 — выплавочная часть, 3 — проток, 4 — теплоизоляционные камеры, 5 — алумина, 6 — пластинчатые молибденовые электроды, 7 — стержневые молибденовые электроды

Классический электрод

111. 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 севанского 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, осветленная стекломасса через проток, расположенный у дна печи, поступает на выработку. Для

кладки бассейна печи используют электроплавленные литые опоры.

Вертикальные печи используют для варки и выработки литучных изделий, трубчатого стекла. Удельный съем стекломассы в вертикальных печах составляет 2,5—3 т/(м²·сут), коэффициент полезного действия — 50—60%.

Особенно целесообразно применять электрические печи для производства стекол с легкими компонентами: боросиликатных, свинцовых, опаловых и др.

На рис. 93 представлена промышленная печь для варки электровакуумного стекла производительностью 14 т·сут. Характеристики печи: площадь варочной части 6,4 м², удельный съем стекломассы 2,6 т/(м²·сут), удельный расход электроэнергии 0,94 кВт·ч/кг, плотность тока на электродах 1,2 А/см².

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

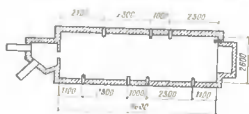
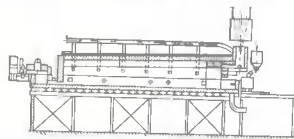


Рис. 94. Газоэлектрическая печь с горизонтальным расположением электродов

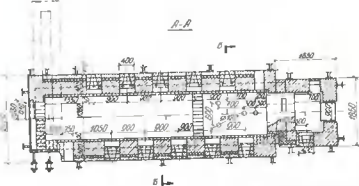
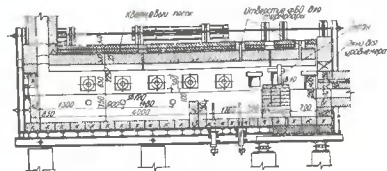
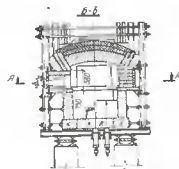


Рис. 95. Газоэлектрическая печь с горизонтальным и вертикальным расположением электродов



районе келья пункта для создания условий, препятствующих прохождению непроваренной стекломассы в зону осветления.

Применяют электроды молибденовые и графитовые. Повышение температуры стекломассы, увеличение потока теплоты шихты ускоряет процесс варки.

Для варки натриево-известковых стекол используют молибденовые стержневые электроды с водяным охлаждением, которые не окрашивают стекломассу (в отличие от графита).

Общий расход теплоты на варку стекла при удельном съеме 2 т (м²·сут) снижается до 7650 кДж/кг.

Расчет электрических печей включает тепловой и электрический расчеты. В тепловой расчет входят со-

ставление 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

$$P = K \frac{Q}{3,6 \cdot 10^3} \quad (59)$$

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 Н. А. Шоудякова [25], $n_1 = 1,05 - 1,1$); n_2 — коэффициент, учитывающий расположение электродов по отношению к зеркалу 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:

$$U = \sqrt{PR \cdot 10^{-3}} \quad (61)$$

$$I = P/U = \sqrt{(P/K) \cdot 10^{-3}} \quad (62)$$

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, устанавливаемых на дно, $K_2 = 1$); S — площадь сечения электродов, м²; l — расстояние между электродами, м

Расположение электродов в ванне показано на рис. 96. В диапазоне $h_s/H = 0,1 - 0,8$ K_1 и K_2 вычисляют по эмпирическим формулам:

$$K_1 = h_s/H + 0,145 (H/h_s)^{0,5} \quad (64)$$

$$K_2 = 1 - 0,0455 (H/h_s) (h_{из}/H)^{0,325} \quad (65)$$

или по графикам (рис. 97, 98).

Электрическое сопротивление стекломассы со стержневыми электродами (расположение показано на рис. 99) может быть рассчитано по формуле

$$R = K_1 \rho (l/h_s b) \quad (66)$$



Рис. 80. Схема расположения пластичных элементов

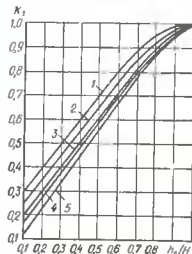


Рис. 07. Значение коэффициента K

$$t = \frac{l}{H} = 0,5; \quad 2 - \frac{l}{H} = 1; \quad 3 - \frac{l}{H} = 2;$$

$$4 - \frac{l}{H} = 3; \quad 5 - \frac{l}{H} = 3$$

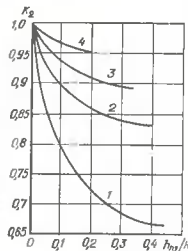


Рис. 98. Значения коэффициентов K_2

$$t - \frac{h_2}{H} = 0,1; \quad 2 - \frac{h_2}{H} = 0,2; \quad 3 - \frac{h_2}{H} = 0,3;$$

$$4 - \frac{h_2}{H} = 0,6$$

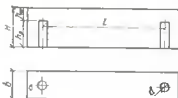


Рис. 88. Схема расположения стержневых электродов в проеме

§ 24. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

Отжиг и закалку изделий производят в специально предназначенных для этого печах, называемых вспомогательными.

По способу оттопления такие печи бывают прямого нагрева, купельными и конвективно-циркуляционными. В печах прямого нагрева теплота передается изделиям излучением и конвекцией от продуктов горения топлива. Движение газов естественное. В муфельных печах передача теплоты изделиям происходит за счет излучения и теплопроводности через стенки муфеля. Движение газов внутри муфеля естественное, в каналах муфеля — принудительное. В современных кошеберных конвективно-циркуляционных отжигательных печах передача теплоты изделиям происходит в основном за счет конвекции, движение газов принудительное. Для оттопления печей применяют газ, жидкое топливо, электроэнергию.

Рис. 100. Овжигуєданың нечб

а — хвосты; б — магнеточная; в — туннельная муфельная с нижней точкой; г — туннельная муфельная с верхней и нижней точками; д — туннельная с ринковым конвейером и электрическим нагревом; е — вертикальная; ж — рабочая камера; з — топка; и — подвод горячего газа из продуктов горения; к — отвод продуктов горения; л — газушка изделия; м — электрические нагреватели; н — выгнетка; о — короб из чугуна; п — режущий путь; р — конвейер; с — выгрузка изделия.

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.

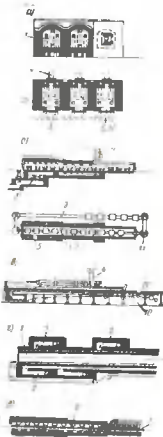
Режим работы печи: разогрев 2—3 ч, укладка изделий 6—7 ч, их отжиг 6—12 ч, выгрузка 3—4 ч. Длительность цикла 16—24 ч. Изделия укладывают на поду или на специальных подставках.

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. В таких печах изделия располагаются 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 движутся по каналу-туннелю. Топки для сжигания топлива располагают в передней части под полом туннеля. Длина туннеля колеблется от 20 до 30 м, высота 0,6—1 м, ширина 1—1,5 м.

Кузов вагонетки изготавливают из листовой стали или металличе-
ской сетки. Расход тепла составляет 4000—12 000 кДж/кг изделий.



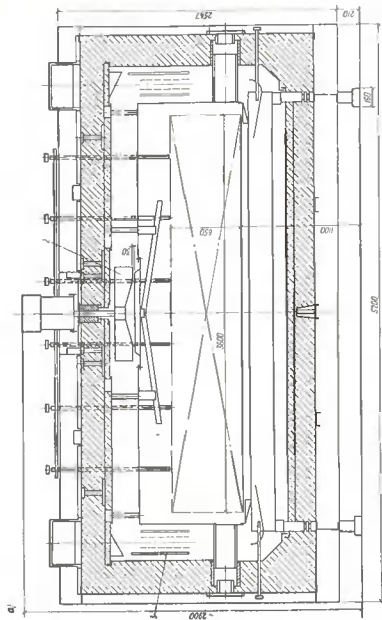
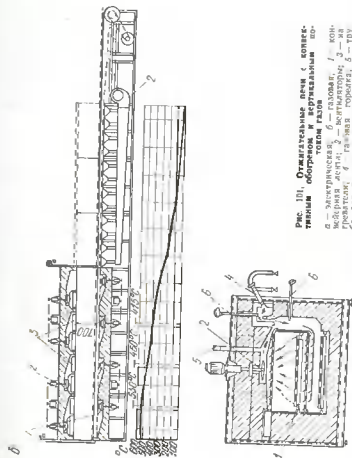


Рис. 101. Отжигательные печи с конвекционным и вертикальным потоком газов



Муфельные туннельные печи (рис. 100, а, г) имеют сетчатый конвейер, муфель, топку для сжигания топлива; верхнюю и нижнюю и используют на заплах тарного и сортового стекла. Работают такие печи на газообразном, жидком топливе и электроэнергии. Муфель изготавливают из карбидных и шамотных 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.

Розливочная отжигательная печь (рис. 100, б) предназначена для отжига прокатного стекла. Печь представляет собой туннель, внутри которого по валикам движется непрерывная лента стекла. Производительность розливочных печей 50—200 т сут. Площадь пода печи колеблется от 100 до 500 м² и зависит 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. Источники теплоты циркуляционных печей — газообразное топливо и электроэнергия.

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 электронагреватель. 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 сетки до 3,6 м; высота над сеткой 0,15—0,4 м; установленная мощность 1000—1600 кВт, число зон автоматического регулирования температуры 17—21.

В нехах, где недостаточны производственные площади, могут быть использованы вертикальные печи (рис. 100, в), которые представляют собой два спаренных между собой канала, по которым движется двуклещный конвейер. Изделия загружают в люльки, идущие вверх, и выгружают из люлек, идущих вниз. Производительность вертикальных печей 1—5 т сут. Расход теплоты 2100—6300 кДж кг изделий.

Расчет режима отжига изделий ведется по термостойкости в зависимости от основы на прямом учете температурных полей в стекловаренных изделиях. Длительность цикла отжига зависит от толщины и длины, 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 горячего газа в стекловаренных печах осуществляется в результате напора, создаваемого нагнетающими устройствами, а также геометрического напора, образующегося в 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-

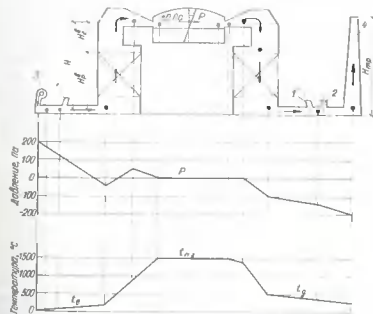


Рис. 102. Движение газов и распределение температур и давлений в стекловаренной печи

1 — воздушный переводной клапан в положении подвода воздуха; 2 — воздушный переводной клапан в положении отвода дымовых газов; 3 — вентилятор подачи воздуха; 4 — дымовая труба; H — высота, определяющая величину геометрического напора; H_г — воздух, поступающий через регенератор; H_в — воздух, идущий через горелку; H_п — трение в газопроводах; P — распределение давлений; t_в — распределение температуры на пути воздуха; t_г — распределение температуры на пути дымовых газов; t₀ — температура прогрева печного

бытке воздуха (коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,1-1,2$). Дымовые газы отводятся через дымовую трубу (при естественной тяге) или дымососами и эжекторами (при принудительной тяге).

Давление в пламенином пространстве печи на уровне стекломассы поддерживается близким к нулю, что исключает подсос холодного воздуха и охлаждение стекломассы. Давление газов увеличивается по направлению к своду 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 снижению их температуры.

Теплопередача. 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 , H_2O , SO_2) и наличия взвешенных частиц сажи. Принято считать, что в ваннах печах 85—90% теплоты передается излучением.

Роль конвекции незначительна, так как скорость движения газов в пламенном пространстве велика 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. Неравномерна и 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 ланной стекловаренной печи, можно определить по формулам В. П. Тимефеева [10]

$$Q_{\Sigma} = C_{T, \text{н.м}} F_{\Sigma} \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\Sigma}}{100} \right)^4 \right], \quad (67)$$

где Q_{Σ} — количество теплоты, передаваемой материалу, Вт; $C_{T, \text{н.м}}$ — приведенный коэффициент излучения газов на материал с учетом роли печных стенок и свода в процессе лучистого теплообмена, Вт $\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$

$$C_{T, \text{н.м}} = 5,67 \varepsilon_T \varepsilon_{\Sigma} \frac{q (1 - \varepsilon_T) \varepsilon_{\Sigma}}{q (1 - \varepsilon_T) [\varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_T (1 - \varepsilon_{\Sigma})] + \varepsilon_T} \quad (68)$$

где ε_T , ε_{Σ} — степень черноты газа и материала; T_T , T_{Σ} — температура газа и материала; K_f , F_{Σ} — поверхность факела и материала, м^2 ; q — угловой коэффициент излучения кладки на материал; q_1 , q_{Σ} — количество теплоты, теряемое 1 м^2 кладки наружу и получаемое от газов конвекцией, Вт м^2 .

Принимая, что тепловые потери через кладку равны количеству теплоты, которую кладка получает от газов конвекцией ($q_1 = q_{\Sigma}$):

$$C_{T, \text{н.м}} = 5,67 \varepsilon_T \varepsilon_{\Sigma} \frac{q (1 - \varepsilon_T) + \varepsilon_T}{q (1 - \varepsilon_T) [\varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_T (1 - \varepsilon_{\Sigma})] + \varepsilon_T} \quad (69)$$

Температуру внутренней поверхности кладки печей можно определить по температуре газа и материала (формулы В. П. Тимефеева)

$$T_{\Sigma}^4 = T_{\text{г}}^4 + \frac{\varepsilon_T [1 + (1 - \varepsilon_T) q (1 - \varepsilon_{\Sigma})]}{q (1 - \varepsilon_T) [\varepsilon_{\Sigma} + \varepsilon_T (1 - \varepsilon_{\Sigma})] + \varepsilon_T} [T_{\text{г}}^4 - T_{\text{м}}^4] \quad (70)$$

Температура кладки возрастает с повышением температуры газов и материала, а также зависит от степени черноты газов:

$$\text{при } \varepsilon_T = 1 \quad T_{\Sigma} = T_{\text{г}}, \quad \text{при } \varepsilon_T = 0 \quad T_{\Sigma} = T_{\text{м}}.$$

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 температуры поверхности кладки ниже, следовательно, в нее необходимо подавать больше теплоты, чем в зону осветления.

Для расчета теплообмена в стекловаренных печах при наличии отдельных факелов (участков) горения газа могут быть использованы уравнения Н. А. Захарикова [20]. При этом принимается, что объем печного пространства над каждым участком (среднее расстояние между влетами смежных горелок) полностью заполнен газом с одинаковой температурой по высоте печи.

Действительное распределение температуры по высоте учитывается опытным коэффициентом при определении эффективной температуры плавления факела.

Результаты измерений теплоотдачи показали, что на указанном участке необходимо учитывать только излучение факела кладки, излучение других факелов учитывать не следует.

Таким образом, теплоотдачу первого факела можно определить по формуле

$$Q_{\Phi_0} = \sigma_1 (T_{\Phi_0}^4 - T_1^4) F_1 + \sigma_{1,2} (T_{\Phi_0}^4 - T_2^4) F_2 \quad (71)$$

Для любого среднего m -го факела

$$Q_{\Phi_m} = \sigma_{m-1,m} (T_{\Phi_m}^4 - T_{m-1}^4) F_{m-1} + \sigma_{m,m+1} (T_{\Phi_m}^4 - T_{m+1}^4) F_{m+1} + \sigma_{m+1,m} (T_{\Phi_m}^4 - T_{m+1}^4) F_{m+1} \quad (72)$$

где σ — эмиссионные коэффициенты излучения, учитывающие совместное излучение факела и кладки, Вт/(м² · К); T_{Φ_1}, \dots — эффективная температура факела К.

T_{Φ} находим по формуле В. Н. Тимофеева

$$T_{\Phi}^4 = T_1^4 + T_2^4 \quad (73)$$

где T_1 и T_2 — соответственно теоретическая температура горения и температура отходящих газов К; ϵ — эмиссионный коэффициент, учитывающий особенности теплообмена, характерные для стекловаренных печей, причем $\epsilon = 0,51$; T_1 — средняя температура поверхности стекломассы данной высоты К; F_1 — площадь зеркала ванны участка, м².

Теплообмен в слое шихты и стекломассы. В пламенных печах шихта и стекломасса нагреваются от излучения пламенного пространства и частично от конвекционных потоков стекломассы. Поверхностный слой шихты быстро нагревается до температуры 1200—1280°С, так как шихта обладает малым коэффициентом теплопроводности.

Шихта покрывается тонким слоем расплава, который непрерывно стекает. Этот расплав (шихтовая пена), богатый пузырьками, распространяется по свободному зеркалу стекломассы зоны варки. По мере стекания верхнего слоя постепенно повышается шихта, находящаяся под ней, и, таким образом, слой шихты уменьшается. Уменьшение слоя шихты также происходит в результате нагрева ее снизу конвекционными потоками стекломассы (составляет 10—20%). Под конвекционными потоками стекломассы находится полурасплавленная шихта, в которой протекают эндотермические реакции с притоком температур 150—200°С [30]. Схема нагрева шихты, по данным [30] показана на рис. 103.

Таким образом, прогрев слоя шихты зависит от спекания поверхностного слоя. Процесс силикатообразования протекает при температуре 800—1200°С и мало зависит от температуры пламенного пространства печи.

Стекающий расплав постепенно нагревается до температуры 1500—1550°С, при которой происходит полное растворение черт кварца и осветление стекломассы.

Проведенные измерения тепловых потоков показали, что шихта поглощает в 2 раза больше 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 воспринимаемой 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 шихты 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 ваннах печей, оказывают потоки стекломассы, которые обусловлены неодинаковой ее плотностью в различных частях печи и сходом стекломассы. Различные плотности стекломассы в печах являются результатом неравномерного распределения ее температуры.

Характер потоков стекломассы зависит от конструкции печи, распределения температуры в ней, свойств стекломассы и производительности печи.

В варочном бассейне печи наблюдаются продольные, поперечные, прямые и возвратные потоки стекломассы (рис. 105).

В продольном направлении образуются два шихта потоков стекломассы: от области максимальной температуры в сторону загрузочного кармана и в сторону выработочного бассейна. В поперечном направлении печи от оси печи в сторону стен бассейна в поверхностном слое стекломассы и от стен к середине в нижнем слое.

Наибольшее значение имеет продольный поток стекломассы, который способствует ее гомогенизации и усадению, а также переносу теплоты, необходимой для покрытия потерь в окружающую среду. Наличие продольного потока от зоны максимальной температуры в сторону загрузки печи затаривает слой шихты в зоне варки и позволяет в зоне осветления иметь чистое зеркало, что оказывает благоприятное влияние на процесс осветления стекломассы.

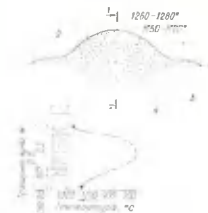


Рис. 103. Схема нагрева шихты

1 — через слой шихты (перепад температуры 100—200°С); 2 — теплообменная шихта с минимальным содержанием жидкой фазы; 3 — нижний слой (перенос температуры 100—150°С); 4 — чистая поверхность зеркала (температура 1150—1200°С).



Рис. 104. Схема распределения тепловых потоков

А — область свинчатого цикла; В — область выработочного цикла; С — турбулентный жеридор; В — чистое зрачение; I — зона шихты; II — зона печи; III, IV, V — температурные зоны; VI — распределение тепловых потоков, воспринимаемых стекломассой в верхней зоне

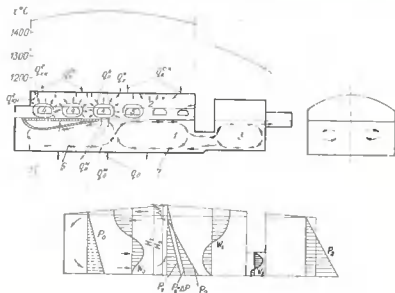


Рис. 105. Схема теплообмена и движения потоков стекломассы

1 — варочный бассейн; 2 — пламенный простейство; 3 — выработочный бассейн; 4 — факел пламени верхней зоны; 5 — то же, зоны свечения; 6 — циркуляционный поток в верхней зоне; 7 — то же, в зоне свечения; $q_{\text{ш}}^{\text{в}}$ — лунный поток тепла от факела, $q_{\text{ш}}^{\text{н}}$ — то же от кладки; $q_{\text{ш}}^{\text{м}}$ — от шихты и стекломассы на кладку; $q_{\text{ш}}^{\text{д}}$ — от дна в сторону стекломассы; $q_{\text{ш}}^{\text{к}}$ — от стекломассы по дну; $q_{\text{ш}}^{\text{кн}}$ — конвекционный поток тепла от талов к кладке; $q_{\text{ш}}^{\text{кш}}$ — от талов к шихте и стекломассе; $q_{\text{ш}}^{\text{кн}}$ — поток тепла от кладки в окружающую среду; $q_{\text{ш}}^{\text{ж}}$ — то же, от дна; $P_{\text{ж}}$ — зпора давления в области затруженной шихты; $P_{\text{ж}}$ — то же, в области минимальных температур; $P_{\text{ж}}$ — то же, в области выработки; $u_{\text{ж}}$, $u_{\text{ж}}$ — скорости стекломассы; $H_{\text{ж}}$, $H_{\text{ж}}$ — высоты соответственно первого и второго слоев стекломассы; ΔH — разность высот слоев стекломассы

Продольный поток стекломассы, поступающей в выработочный бассейн, частично идет на выработку изделий, частично возвращается в зону максимальных температур.

Отношение количества стекломассы, поступающей в выработочный бассейн, к количеству выработочной стекломассы называют коэффициентом потока.

Для правильного распределения зон в печи требуется умение рассчитать потоки стекломассы и регулировать их автоматически. Движение потоков стекломассы изучают путем наблюдения за дви-

жением шажотных порывков, использованием люминесцирующих индикаторов (двуокись церия), радиоактивных индикаторов, по характеру разведения 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 предложил для расчета потока стекломассы (м мало) применить уравнение движения несжимаемой вязкой жидкости вдоль оси x (продольной оси печи), оси y (ее поперечной оси), оси z (вертикальной вниз):

$$\rho \, dx \, dy = \mu \, (d^2 u / dz^2) \, dz. \quad (74)$$

А. А. Соколов [10] предложил уравнения (табл. 14) для упрощенного расчета потоков стекломассы, выведенные при допущении, что отсутствуют выработочный и поперечный потоки, уровни нейтральных давлений и нулевые скорости совпадают, распределение температур в стекломассе задано и не зависит от потоков; значения вязкости по длине потока усреднены.

В дальнейшем для решения уравнений по указанному методу [10] было предложено использовать метод конечных разностей.

Разработанный метод расчета потоков стекломассы [14] позволяет учесть трение стекломассы о боковые стены, а также фактическое распределение температур, вязкости 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 трубки 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 граням S_1, S_2, S_3, S_4 ; F_5, F_6 — силы, действующие на торцовые грани; D — скорость изменения количества движения выделенного объема стекломассы, которое зависит от изменения плотности (температуры) стекломассы.

Отдельные члены уравнения определяют следующим образом:

$$D = \int_{S_1} \gamma(x, y, z) \, w^2(x, y, z) \, dxdy - \int_{S_1} \gamma(x, y, z) \, w^2(x, y, z) \, dxdy;$$

$$F_1 = \int_{S_1} \mu(x + \Delta x, y, z) \, \frac{dw(x + \Delta x, y, z)}{dz} \, dydz;$$

Таблица 14. Формулы упрощенного расчета конвекционных потоков стекломассы

Параметры потока стекломассы	Верхний поток		при свободной поверхности	Нижнее отверстие или свободная поверхность
	при свободной поверхности	при свободной поверхности		
Толщина, м	$h_1 = \frac{H}{1 + \sqrt{\frac{5\mu_1(t_{1,1}-t_{1,2})}{\mu_2(t_{2,2}-t_{1,2})}}}$	$h_2 = \frac{H}{1 + \sqrt{\frac{\mu_2(t_{2,1}-t_{1,1})}{\mu_1(t_{2,2}-t_{1,2})}}}$	$h_3 = \frac{H}{1 + \sqrt{\frac{\mu_2(t_{2,1}-t_{1,1})}{\mu_1(t_{2,2}-t_{1,2})}}}$	$h_4 = H - h_1$
Максимальная скорость, м/с	$w_1, \text{ макс} = \frac{2000(t_{2,1}-t_{1,1})H^2}{\mu_1 l}$	$w_2, \text{ макс} = \frac{375(t_{2,1}-t_{1,1})H^2}{\mu_1 l}$	$w_3, \text{ макс} = \frac{375(t_{2,1}-t_{1,1})H^2}{\mu_1 l}$	$w_4, \text{ макс} = \frac{375(t_{2,1}-t_{1,1})H^2}{\mu_2 l}$
Средняя скорость, м/с	$w_1, \text{ ср} = \frac{5}{8} w_1, \text{ макс}$	$w_2, \text{ ср} = 0,645 w_1, \text{ макс}$	$w_3, \text{ ср} = 0,645 w_1, \text{ макс}$	$w_4, \text{ ср} = 0,645 w_2, \text{ макс}$
Расход, м ³ /ч	$G = w_1, \text{ ср} B h_1$	$G = w_1, \text{ ср} B h_1$	$G = w_1, \text{ ср} B h_1$	$G = w_2, \text{ ср} B h_2$

Примечание. H — толщина слоя, м; B — ширина ванны, м; μ — вязкость стекломассы, [(с·м)/м²]; w_1, w_2, w_3, w_4 — скорости соответственно верхнего и нижнего потоков, м/с; $t_{1,1}, t_{1,2}$ — средние температуры соответственно верхнего и нижнего потока по вертикали 1, $t_{2,1}, t_{2,2}$ — то же, по вертикали 2; h_1, h_2 — соответственно толщина верхнего и нижнего потоков, м.

$$I_2 = - \int_{y_2}^y \int_{z_2}^z \mu(x, y - \Delta y, z) \frac{dw(x, y - \Delta y, z)}{dx} dy dz,$$

$$I_3 = \int_{y_1}^y \int_{z_1}^z \mu(x, y - \Delta y, z) \frac{dw(x, y - \Delta y, z)}{dy} dx dz. \quad (76)$$

$$I_4 = - \int_{y_1}^y \int_{z_1}^z \mu(x, y, z) \frac{dw(x, y, z)}{dy} dx dz;$$

$$F_1 = \int_{y_2}^y \int_{z_2}^z P(x, y, z) dx dy;$$

$$F_2 = - \int_{y_1}^y \int_{z_1}^z P(x, y, z) dx dy.$$

Подставляя в уравнение (75) значения всех входящих в него величин, деля 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 $\mu(x, y) = \mu(x, y, z)$ — вязкость в точке сечения.

Давление $P(x, y, z)$ можно считать равным массе столба стекломассы над соответствующей точкой (x, y, z) :

$$P(x, y, z_2) - P(x, y, z_1) = \rho \int_{z_1}^{z_2} [w(x, y, z) - w(x, y, z_1)] dx + \Delta P - F(x, y) - \Delta P, \quad (78)$$

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):

$$\frac{d}{dx} \left[\mu \frac{dw^0}{dx} \right] = \frac{d}{dy} \left[\mu \frac{dw^1}{dy} \right] = F(x, y), \quad (79)$$

$$\frac{d}{dx} \left[\mu \frac{dw^0}{dx} \right] = \frac{d}{dy} \left[\mu \frac{dw^0}{dy} \right] = 0. \quad (80)$$

Тогда ввиду линейности рассматриваемых уравнений (79), (80) справедливо следующее равенство.

$$w(x, y) = w^0(x, y) - \Delta P w^0(x, y). \quad (81)$$

Выработка M (в технической единице массы) за единицу времени выражается формулой

$$M = \iint \gamma(x, y) \omega(x, y) dx dy = \iint \gamma(x, y) \omega^0(x, y) dx dy + \Delta P \iint \gamma(x, y) \omega^0(x, y) dx dy. \quad (82)$$

Отсюда

$$\Delta P = \frac{M - \iint \gamma(x, y) \omega^0 dx dy}{\iint \gamma(x, y) \omega^0 dx dy}. \quad (83)$$

Вычислив интеграл $\iint \gamma \omega^0 dx dy$ по той части сечения, где $\omega(x, y) > 0$, найдем расход потока в прямом направлении; по той части сечения, где $\omega(x, y) < 0$, 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 $\iint \gamma \omega^0 dx dy$ и $\iint \gamma \omega^0 dx dy$, вычисление ΔP и уравнение $\omega(x, y) = \omega^0(x, y) + \Delta P \omega^0(x, y)$, 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 $0 < x < H$; $-\frac{B}{2} < y < \frac{B}{2}$ и граничные условия

$$\omega|_{x=H} = 0; \quad \omega|_{y=-\frac{B}{2}} = 0, \quad \omega|_{y=\frac{B}{2}} = 0, \quad (1-\alpha)\omega + \alpha \frac{d\omega}{dx} \Big|_{x=0} = 0, \quad (84)$$

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 $\iint \gamma \omega^0 dx dy$ и $\iint \gamma \omega^0 dx dy$ вычисляем по формуле Симпсона приближенного интегрирования, проводя дальнейшие расчеты по формуле

$$\iint \gamma(x, y) dx dy = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \left(\int_0^H \gamma(x, y) \omega(x, y) dx \right) dy. \quad (85)$$

После того как вычислены интегралы, можно определить ΔP , используя формулу (83). Теперь можно вычислить интенсивность 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 варки стекла с использованием электронно-вычислительных машин (ЭВМ).

Автоматизированная система управления процессом варки стекла включает:

- стабилизацию теплового режима во всех зонах печи посредством стабилизации температуры изменением расхода газа;
- поиск и поддержание оптимального соотношения газа и воздуха по зонам изменением расхода газа и воздуха;
- стабилизацию давления в варочной и выработочной частях изменением разрежения в дымовых каналах;
- стабилизацию уровня стекломассы изменением количества загружаемой шихты;

управление переводом направления пламени (для регенеративных печей) и выравнивание температурного перепада регенераторов изменением времени перевода направления пламени.

С помощью ЭВМ осуществляется выдача информации о параметрах печи: температуры и давления в плазменном пространстве, температуры стекломассы, температуры регенераторов (верха и низа), расхода газа и воздуха, а также давления газа и разрежения в дымовом канале за печью, уровня стекломассы, содержания кислорода в отходящих газах по горелкам и другие данные.

Выходящая информация от ЭВМ представляется на дисплее в виде периодически обновляемой таблицы, а также в форме емкостного и дневного докладов.

Для наблюдения за процессом горения топлива (факела) используется промышленное телевидение.

В автоматизированной системе используют электронно-вычислительные машины типа «Электроника-1001» и др.

Контроль режимов печи осуществляется с использованием контрольно-измерительной аппаратуры. Такая аппаратура представляет собой для измерения температуры (термометры, оптические пиетометры), давления газа (манометры), состава дымовых газов (ручным и автоматическим газоанализаторами), расхода газа и воздуха (расходомерами), уровня стекломассы (уровнемерами) и других параметров.

Автоматическое регулирование температурного режима в варочной и выработочной частях осуществляется по зонам с помощью рефлексного 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 платиновой-платинородовые,

ГЛАВА IX. ПЕЧИ ДЛЯ ОБЖИГА ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ

§ 27. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ ЦЕМЕНТНОЙ СЫРЬОВОЙ 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 окись (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 связанном состоянии в виде силикатов, алюминатов и алюмоферритов.

Свойства портландцемента как вяжущего материала характеризуются прежде всего свойствами составляющих его искусственных минералов, основными из которых являются: трехкальциевый силикат ($3 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), двухкальциевый силикат ($2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), алюмоферриты кальция переменного состава от $8 \text{CaO} \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x \text{Fe}_2\text{O}_3$ до $2 \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и алюминаты кальция состава $2 \text{CaO} \cdot x \text{Al}_2\text{O}_3$ до $5 \text{CaO} \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3$.

Кроме того, в клинкере могут быть и другие минералы, образующие химическими примесями в исходном сырье.

Количественное содержание указанных минералов в клинкере зависит от химического состава исходной сырьевой смеси, от режима обжига и охлаждения клинкера.

Образованию 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; рекристаллизация монофаз и образование твердых растворов на низкотемпературной стадии обжига; растворение и распада перекристаллизующихся 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 цепкой

расположенные в своде и дне печи. Для измерения температуры в секциях регенераторов устанавливаются термопары, сверху — платинородий-платинородиновые, внизу — хромель-алюмелевые. Они подключаются к многооточечным 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 знакам. Давление в пламенном пространстве варочной и выработочной частей печи регулируется также электронным регулятором, который в зависимости от направления пламени воздействует на один из исполнительных механизмов, сочлененных с поворотными шиберами, установленными в дымоотводящих каналах с обеих сторон печи. Первичным прибором является дифманометр.

Разрежение перед шибером дымовой трубы измеряется дифманометром в комплексе с вторичным прибором. Расход газа и воздуха измеряют дифманометрами и вторичными приборами.

Непрерывный контроль за содержанием кислорода в отходящих газах производится с помощью газоанализатора (типа МН-1506).

Показания температур во всех точках, расход газа и воздуха по счетчикам, давление газа, разрежение и другие параметры вводятся в ЭВМ, а также регистрируются вторичными приборами, установленными на щитах автоматизации.

Автоматическое переключение переводных клапанов регенеративных стекловаренных печей осуществляется по времени или по разности температуры верха или низа регенераторов. В промышленности переключение переводных клапанов принято через 25—30 мин.

Перевод направления пламени осуществляется в такой последовательности: звуковой сигнал о начале периода, закрытие газового клапана с одной стороны и отключения подачи воздуха, перевод шиберов, включение подачи воздуха, открытие газового клапана с противоположной стороны. В случае незавершения перевода пламени 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 стеклослойкой 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 отдельном помещении.

Первичные приборы и датчики, а также камеры промышленной фотографии установки располагаются по месту в зоне печи; шихты с приборами, ЭВМ, диспетчер — в помещении пункта АСУ ТП.

завесе начинают образовываться гранулы, которые покидают центральную 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 центральную завесу газовый поток имеет температуру 800—1000° С, а по выходе из нее — около 150—250° С.

В следующей технологической зоне — подогрева и дегидратации — материал досушивается и нагревается до 600° С. При температуре материала 450° С начинается процесс дегидратации, и далее по мере повышения температуры каолиновое 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 главной 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 топлива. Образуемая в результате декарбонизации CaO в силу повышенной химической активности может вступать в реакцию с кислотными оксидами 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 материал 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 $3\text{CaO} \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 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 завершённым.

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 сжигания топлива, 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) из тонкого измельчения исходных сырьевых материалов с водой. Влажность сырьевого шлама, выражающаяся 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 (растексаемость) для последующей транспортировки по трубопроводам.

При сухом способе сырьевые материалы предварительно высушивают, и весь дальнейший процесс приготовления сырьевой смеси производят в сухом состоянии.

Выбор способа получения цементного клинкера определяется многими факторами, но главными из них являются естественная влажность сырьевых компонентов и стоимость топлива. Несомненными достоинствами сухого способа являются существенно меньший удельный расход топлива 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 вешовой шестерней, привода вращения, роликоопор, встроивших или выносных теплообменников, холодной и горячей ложков с уплотнительными устройствами. Корпус печи сваривается из металлических обечайек. На нем закрепляют на прокладках массивные кольца прямоугольного сечения, которые называют бандажами. Участки корпуса печи, где устанавливают бандажи обечайки, называют литыми для печи диаметром менее 4 м, а для печей больших диаметров — сварными

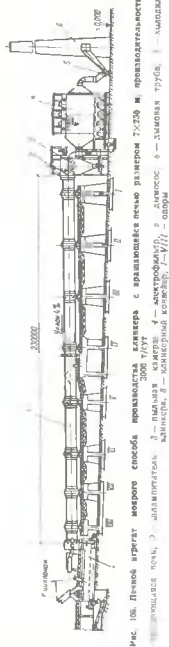


Рис. 106. Плановый агрегат мокрого способа производства кирпича с вращающейся печью размером 7x230 м, производительностью 3000 т/сут. 1 — вращающаяся печь, 2 — электропривод, 3 — пылевая камера, 4 — электрооборудование, 5 — пылевая камера, 6 — пылевая камера, 7 — пылевая камера, 8 — пылевая камера, 9 — пылевая камера, 10 — пылевая камера, 11 — пылевая камера, 12 — пылевая камера, 13 — пылевая камера, 14 — пылевая камера, 15 — пылевая камера, 16 — пылевая камера, 17 — пылевая камера, 18 — пылевая камера, 19 — пылевая камера, 20 — пылевая камера, 21 — пылевая камера, 22 — пылевая камера, 23 — пылевая камера, 24 — пылевая камера, 25 — пылевая камера, 26 — пылевая камера, 27 — пылевая камера, 28 — пылевая камера, 29 — пылевая камера, 30 — пылевая камера, 31 — пылевая камера, 32 — пылевая камера, 33 — пылевая камера, 34 — пылевая камера, 35 — пылевая камера, 36 — пылевая камера, 37 — пылевая камера, 38 — пылевая камера, 39 — пылевая камера, 40 — пылевая камера, 41 — пылевая камера, 42 — пылевая камера, 43 — пылевая камера, 44 — пылевая камера, 45 — пылевая камера, 46 — пылевая камера, 47 — пылевая камера, 48 — пылевая камера, 49 — пылевая камера, 50 — пылевая камера, 51 — пылевая камера, 52 — пылевая камера, 53 — пылевая камера, 54 — пылевая камера, 55 — пылевая камера, 56 — пылевая камера, 57 — пылевая камера, 58 — пылевая камера, 59 — пылевая камера, 60 — пылевая камера, 61 — пылевая камера, 62 — пылевая камера, 63 — пылевая камера, 64 — пылевая камера, 65 — пылевая камера, 66 — пылевая камера, 67 — пылевая камера, 68 — пылевая камера, 69 — пылевая камера, 70 — пылевая камера, 71 — пылевая камера, 72 — пылевая камера, 73 — пылевая камера, 74 — пылевая камера, 75 — пылевая камера, 76 — пылевая камера, 77 — пылевая камера, 78 — пылевая камера, 79 — пылевая камера, 80 — пылевая камера, 81 — пылевая камера, 82 — пылевая камера, 83 — пылевая камера, 84 — пылевая камера, 85 — пылевая камера, 86 — пылевая камера, 87 — пылевая камера, 88 — пылевая камера, 89 — пылевая камера, 90 — пылевая камера, 91 — пылевая камера, 92 — пылевая камера, 93 — пылевая камера, 94 — пылевая камера, 95 — пылевая камера, 96 — пылевая камера, 97 — пылевая камера, 98 — пылевая камера, 99 — пылевая камера, 100 — пылевая камера.

из двух половин. Для печей мокрого способа производства вращающуюся шестерню устанавливают примерно на середине, а для сухого способа — ближе к «холодному» концу печи.

Вращающаяся шестерня находится в зацеплении с подвешенной 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. Бандажки опираются 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 уплотняющие устройства, препятствующие подосу наружного воздуха в печное пространство.

На рис. 106 показан общий вид печного агрегата с вращающейся печью размером 7 × 230 м. Вращающаяся печь оснащена внутренними теплообменными устройствами и предназначена для производства цементного клинкера по мокрому способу производства. Она состоит из цилиндрического сварного корпуса, устанавливаемого на роликоопорах, двухстороннего привода, загрузочной и разгрузочной частей, газовых форсунок с механизмами перемещения, устройств для возврата пыли, уловленной в электрофильтрах, и уплотнений концов печи. Внутри корпуса смонтированы теплообменные устройства, а собственно корпус защищен футеровкой из огнеупорного кирпича.

Исходное сырье в виде жидкотекучего шлама подается в печь

по наклонной трубке. Обожженная в печи сырая смесь в виде клинкера поступает в колошниковый 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 уклон 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 редуктора главного привода и подвешенных шестерен — жидкая, циркуляционная, централизованная.

Техническая характеристика агрегата с вращающейся печью

Внутренний диаметр корпуса печи, м	7
Длина корпуса печи, м	230
Уклон 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—1230

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 навешивают цепные завесы. При вращении печи цепи периодически омываются шламом и газовым потоком. Находясь в газовом потоке, цепи аккумуляруют тепло, а затем часть его отдают шламу. Цепи также улучшают контакт газового потока со шламом, который интенсифицирует процесс испарения влаги из шлама. Во время сушки шлам изменяет свои реологические свойства и из жидкотекучего становится вязким и затем сыпучим.

В связи с широким диапазоном изменения свойств шлама по длине зоны сушки изменяется и теплотехнический режим работы цепей. В зоне жидкотекучего шлама на цепях создается сравнительно тонкая, непрерывно обновляющаяся пленка шлама. В этом режиме цепи работают частично по регенераторному циклу, т. е. получают тепло от газового потока и отдают его 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 малочувствительна к изменению реологических свойств шлама в процессе сушки. Эффективность ее как теплообменного устройства возрастает по мере увеличения плотности навески. Недостатком свободно висящей навески 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 колышках, установленных на равных расстояниях один от другого; на продольных подках, несколько смещенных по отношению к оси печи и так называемая коридорная система. Навеска цепей на подках, смещенных 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 колышках, приваренных к корпусу печи на равном расстоянии один от другого, второй — навеску в виде трехзаходного винта. Раньше применялась навеска цепей на продольных швеллерах, приваренных к корпусу печи. Гирлянда цепи закреплялась на двух колышках 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 провисают, на втором участке цепи короче и провисают соответственно меньше.



Рис. 107. Свободно висящая цепная завеса



Рис. 108. Гирляндная цепная завеса с повышенной транспортирующей способностью

Этот прием позволяет создать лучшие условия для обеспыливания 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 делают несколько короче. Укороченные гирлянды меньше провисают, что способствует сохранности полученных ранее гранул шлама.

По данным испытаний вращающейся печи после навески гирляндной 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 пылевынос из печи. Гранулометрический состав материала по выходе из гирляндной 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 фракции, %	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 сжигания. В дробинном случае замываются цепи и шлам переливается в пыльную камеру.

В случаях когда шлам обладает высокими эластичными 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 ПИИЦементе 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

$$Nu = 0,1 Re^{0,65} \quad (87)$$

В «горячей» части цепной завесы, как уже упоминалось, цепи работают в регенеративном цикле и коэффициент теплоотдачи подчитывают по следующей формуле:

$$\alpha_{\text{рег}} = \frac{1}{\frac{2\pi}{\alpha_r (2\pi - q)} + \frac{2\pi}{\alpha_m q}} \quad (88)$$

где α_r — коэффициент теплоотдачи от газа к цепям; α_m — коэффициент теплоотдачи от цепей к материалу; q — центральный угол сечения 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

$$Nu = 0,347 Re^{0,65} \quad (90)$$

К характеристикам цепных завес следует отнести также плотность навески цепей, предельное значение которой определяют исходя из условия достаточной транспортирующей способности. Для цепей с повышенной транспортирующей способностью конструкции ПИИЦемент это условие отпадает. При этом максимальную плотность навески цепей определяют так, чтобы цепи не заземлялись. Кроме того, необходимо соблюдать порядок прохождения отдельных 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 транзиты материала. В той части пращающейся 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 лопастей; циклонные; экраннующие.

Ячейковые металлические и керамические теплообменники. В ячейковых теплообменниках печь разделена на ячейки, по которым вдоль полков теплообменника проходит расчлененный 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 аккумулярованную теплоту материалу путем теплопроводности и излучения. Количество теплоты, переданной материалу, будет зависеть от поверхности теплообменников, их массы и теплофизических свойств материала.

Расчленение 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]:

$$L_T = G \varepsilon_r \alpha_r F_T M_T \quad (91)$$

где L_T — длина участка печи длиной теплообменников, м; G — производительность печи, кг/с; $F_T = \pi D (1 - K_1)$ — условная поверхность теплообменников, приходящаяся на 1 м длины печи; D — внутренний диаметр печи, м; $K_1 = \frac{f_T}{\pi D}$ — отношение поверхности теплообменников к внутренней поверхности футеровки на 1 м длины печи; $\alpha_r = 14,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ — коэффициент теплоотдачи; $\text{Вт} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}}$; Дж — скорость газового потока, м/с; M_T — среднетемпературная разность температур между газовым потоком и материалом; ε_r — коэффициент теплового поглощения материала в заданном температурном интервале.

Среднеарифметическая разность температур

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{(t_1' - t_1'') - (t_2' - t_2'')}{2,31g \frac{t_1' - t_2'}{t_1' - t_2''}} \quad (92)$$

где t_1' — температура газового потока на выходе из теплообменников, °С;
 t_1'' — температура газового потока на входе в теплообменники, °С; t_2' — температура материала на входе в теплообменники, °С; t_2'' — 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

$$q_{\text{т}} = I_1' - I_1'' - q_{\text{п}}, \quad (93)$$

где $I_1' = V_1' c_1' t_1'$ — энтальпия газового потока на входе в теплообменники, кДж/ч; $I_1'' = V_1'' c_1'' t_1''$ — энтальпия газового потока на выходе из теплообменников, кДж/ч; $q_{\text{п}}$ — потеря теплоты корпусом печи на участке установки теплообменников, кДж/кг клинкера; $V_1' = V_1''$ — количество газов на входе в теплообменник и выходе из него, м³/кг клинкера; c_1' , c_1'' — теплоемкости газа при t_1' и t_1'' .

Следует иметь в виду, что t_1'' не следует принимать ниже 700° С из-за условий достаточной эффективности работы щелочной зоны.

Металлические теплообменники всех типов устанавливают в той части работающей 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 пылеобразование на участке установки теплообменников. Это ограничивает широкое распространение ячеекых теплообменников в промышленности.

На рис. 109, 110 показаны схемы конструкции ячеекых металлических и керамических 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 звеньями во время нахождения в газовом

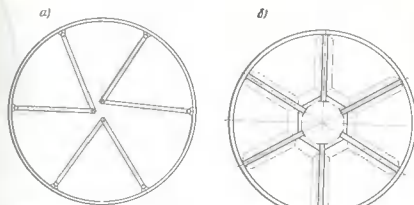


Рис. 109. Ячеекые (а, б, в) металлические теплообменники

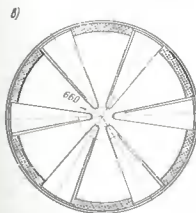


Рис. 110. Ячеекый керамический теплообменник

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 накопленную теплоту из-за полного погружения ветви теплообменника в материал.

В звеньевом теплообменнике в регенеративном цикле передачи теплоты участвуют только отдельные звенья без его центральной части. Пылеобразование более значительно у гирляндных теплообменников за счет разрушения тяжелыми элементами теплообменника гранул материала.

Такие теплообменники являются хорошим экраном для щелей и предохраняют их от преждевременного выгорания. Изготавливают эти теплообменники из наиболее жаростойких сталей, и их можно применять в более горячих зонах печи, нежели металлические ячеекые теплообменники.

Число рядов и длину участка печи, где устанавливают теплообменники, подбирают опытным путем.

Теплообменники в виде пересылающих лопастей по устройству наиболее просты и представляют собой ряд лопастей из металла или керамики. К ним можно отнести также различные типы рифленых футеровок. В теплотехническом отношении пересылающие лопасти могут обеспечить максимальную интенсивность нагревания сырья при взвешивании в газном потоке значительной массы материала.

Интенсивное перемешивание вызывает одновременно разрушение гранул материала, взмучивает содержащуюся в потоке материала пыль, которая уносится газами, увеличивая пылеунос из вращающейся печи. Этот существенный недостаток пересылающих теплообменников ограничивает их распространение.

При правильном сочетании теплообменников с пересылающей лопастью 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. Их установка увеличивает поверхность теплоотдачи и изменяет теплопроводность поверхностного слоя 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 теплоусвоения, определяемый по формуле

$$\alpha = \frac{1}{\epsilon \lambda} \quad \text{где } \epsilon = 17,5 t, \quad (91)$$

где ϵ — теплоемкость, кДж/кг·°С; λ — теплопроводность, кВт/м·°С; t — частота вращения печи, мин⁻¹.

Исходя из значений величин, входящих в формулу (91) для шимотного кирпича и экранирующих теплообменников, и полученных из чугуна, приведенных в табл. 15, видно, что установка теплообменников позволит примерно на 20—25% увеличить количество переданной теплоты.

Таблица 15. Теплофизические свойства экранирующих теплообменников

Материал	Теплофизические свойства		
	λ , Вт/м·°С	ϵ , кДж/кг·°С	γ , кг/м ³
Шимотный кирпич	1,05	1,05	1600
Чугунные башмаки	45	0,7	7900

Однако экранирующие теплообменники имеют недостатки, из которых главным следует считать уменьшение их поверхности шла-

мом, из-за чего резко сокращается тепловая эффективность теплообменников.

Конструкция циклоидного металлического теплообменника разработана в НИИЦементе. Он в значительной мере устраняет недостатки зенитных теплообменников.

Конструктивно такой теплообменник представляет собой набор трапециевидных лопастей, отвальцованных по определенному радиусу, который обеспечивает скольжение слоя обжигаемого материала по внешней поверхности элементов теплообменника без отрыва, что обеспечивает минимальное пылеобразование в зоне установки теплообменников. Элементы теплообменника устанавливают в печи выключкой стороной в направлении геометрической оси в коридорном порядке по шести рядов в поперечном сечении. Угол наклона оснований элементов теплообменника к образующей корпуса печи составляет 15—23°.

Эксплуатация циклоидного теплообменника показала его высокую надежность в работе, простоту монтажа и главное — стабильность тепловых и технологических режимов работы вращающихся печей.

Установка циклоидных теплообменников во вращающихся печах увеличивает их производительность на 5% и обеспечивает снижение удельного расхода топлива на обжиг до 7% при общем уменьшении пылеуноса из рабочего пространства. Общий вид установки циклоидного теплообменника во вращающейся печи показан на рис. 111.



Рис. 111. Циклоидный теплообменник

УСТАНОВКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ С МЕХАНИЧЕСКИМ ОБЕЗВОЖИВАНИЕМ ШЛАМА

Использование во вращающихся печах мокрого способа производства клинкера встроенных теплообменных 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 предварительное механическое обезвоживание шлама преимущественно путем использования фильтпресов. В практике производства цемента в зарубежных, индустриально развитых странах имеется опыт работы реконструированных печных установок с использованием глубокого обезвоживания



Рис. 112. Схемы вращающихся печей с предварительной фильтрацией шлама: а — печь для полумокрого способа; 1 — пресс-фильтр; 2 — вращающаяся печь с короткой цепной завесой; б — печь для сухого способа с сушилкой-дробилкой; 1 — пресс-фильтр; 2 — сушилка-дробилка; 3 — вращающаяся печь; в — печь для сухого способа с подогревателем; 1 — пресс-фильтр; 2 — радиатор; 3 — колонниковая решетка-подогреватель; 4 — короткая вращающаяся печь.

ности 18%. Затраты электроэнергии на обезживание составят 18 кВт · ч, т. е. или 65 кДж/кг клинкера, что в сумме составит 4665 кДж/кг клинкера и позволит сэкономить 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-сушилка, и печь питается практически сухим шламом. В этом случае можно получить 30—35% экономии топлива.

В схеме с более глубоким теплоиспользованием (рис. 112, в) предусмотрены грануляция фильтрованного продукта и последующий подогрев его на колосниковой решетке за счет теплоты отходящих газов короткой вращающейся печи. В этом случае можно получить экономии топлива до 40—45%. Известны и другие схемы с использованием фильтр-прессов, в которых предполагается измельчать высушенный 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-

соба составляет 12—20, т. е. значительно меньше, чем для печей мокрого способа производства.

Вращающаяся печь ставится ближе к «холодному» концу печи. В связи с тем что вращающиеся печи сухого способа питаются 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, колосниковой холодильника переталкивающего типа, тягодутьевого и обеспыливающего оборудования. Корпус вращающейся печи представляет собой сварной полый цилиндр внутренним диаметром 6,4 м и длиной 95 ч, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом. 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 подвешенной шестерни, входящей в зацепление с зубчатой венцом, закрепленным на корпусе печи. Разгрузочная часть печи входит в «горячую» головку, которая предназначена для сопряжения печи с колосильным и установкой топливных форсунок или горелок. Противоположная загрузочная часть печи входит в загрузочную головку через специальное уплотнение для снижения подсоса холодного воздуха и тем самым потерь теплоты.

Каждая из двух параллельных ветвей запечных циклонных теплообменников состоит из четырех ступеней циклонов, которые расположены друг над другом и последовательно соединены между собой газохладами. Газоходы нижних ступеней циклонов соединены непосредственно с загрузочной головкой печи. К разгрузочному корпусу каждого из циклонов присоединены течки, по которым сырая мука поступает в нижерасположенный газохлад циклона. Печные газы, охлажденные в циклонных теплообменниках до 300—350°С, в дальнейшем используются в номальном агрегате для подсушки сырьевой муки, а затем направляются в систему пылеочистки и выбрасываются в атмосферу.

Температуру газов, выходящих из циклонных теплообменников (при отключении номального агрегата), снижают с помощью установок для охлаждения газов тонко распыленной водой. Использо-

Пижне циклоны 5 и 6 обычно фатеруют 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 газходы 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 проточном их движении и при очень высокой интенсивности нагревания частиц материала, что приводит к выравниванию температур твердой и газообразной фаз. Иными словами, температура сырьевой муки, вы-

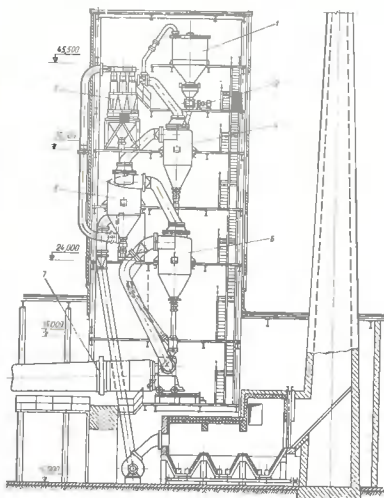


Рис 114 Схема установки циклонных теплообменников

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 нижерасположенную ступень с более высокой температурным потенциалом газовой фазы создается теплообменная система, равноценная по теплообмену в перекрестном токе.

Практика показала, что для эффективного использования топлоты газов достаточно четырех или пяти ступеней циклонов. Дальнейшее увеличение ступеней циклонов приведет к еще более полной утилизации топлоты, однако, как показывают расчеты, затраты электроэнергии на преодоление гидравлического сопротивления циклонов не окупаются.

Время пребывания сырьевой муки в циклонных теплообменниках, по расчетным данным, не превышает 30 с, но за это время сырьевая мука нагревается до 800—850°С и на 20—25% декарбонизируется. Это можно объяснить высокой интенсивностью процессов тепло- и массообмена во 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 имеющийся опыт эксплуатации циклонных теплообменников позволяет считать, что при конструкторских расчетах размеров газыходов и циклонов следует принимать во внимание только требования аэродинамики и пылеемкости 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 циклонными 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 дополнительно сжигается топливо при температуре близкой 900—950°С, можно достигнуть высокой степени декарбонизации (до 80—90%), как показывает опыт работы выносных декарбонизаторов в Японии. Высокая степень термической подготовки сырьевой смеси перед поступлением ее во вращающуюся печь позволяет использовать ее только для спекания 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]. Общим для всех известных схем с предварительной декарбонизацией сырья яв-

В Японии разработана и успешно эксплуатируется система с декарбонизатором РСП (рис. 116). В нижней части декарбонизатора, представляющего собой шахтный вихревой калциниатор, 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 калциниатор из циклонов второй ступени (по ходу газов). Воздух из колосникового холодильника для горения топлива подается раздельно в вихревую камеру и вихревой калциниатор, где сырьевая мука завихряется в потоке высокотемпературного воздуха из холодильника. Из калциниатора сырьевая мука попадает в смесительную камеру, где декарбонизация сырьевой муки завершается в печных отходящих газах с температурой 85—95%. Установка оборудована пережимом между калциниатором и камерой смешения, который позволяет интенсифицировать образование смеси топлива с воздухом.

На рис. 117 показана установка с декарбонизатором конструкции фирмы «Смидт» (Дания). Конструкция установки позволяет раздельно регулировать процессы, происходящие в разных ветвях циклонных теплообменников с помощью отдельных дымососов, а также низкотемпературным 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 ветвь 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 при максимально развитой поверхности контакта твердой и газообразной фаз и немедленном удалении образующихся продуктов разложения карбонатной составляющей: окиси 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-

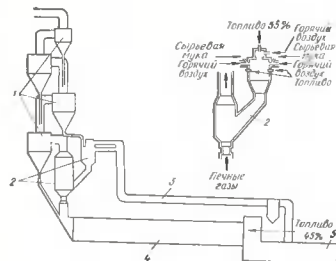


Рис. 116. Схема установки вращающейся печи с циклонными теплообменниками и калциниатором РСП
1 — циклонный теплообменник, 2 — колосниковый холодильник, 3 — вихревой калциниатор, 4 — трубопровод горячего воздуха, 5 — трубопровод сырьевой муки, 6 — колосниковый холодильник

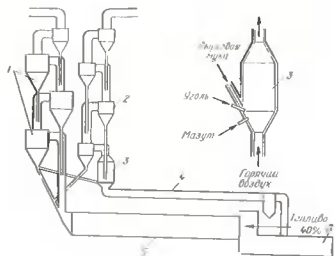


Рис. 117. Схема установки вращающейся печи с циклонными теплообменниками и калциниатором ФПС
1 — ветвь циклонного теплообменника без калциниатора, 2 — вихревой калциниатор, 3 — колосниковый холодильник, 4 — трубопровод горячего воздуха, 5 — трубопровод сырьевой муки, 6 — колосниковый холодильник

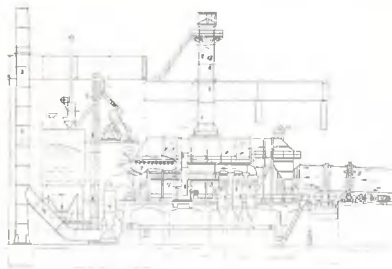


Рис. 119. Вращающаяся печь

1 — силос сырья; 2 — конвейер; 3 — ковшовый элеватор; 4 — бункер сырья; 5 — тарельчатый топливный кланкер; 10 — «горячий» камер; 11 — дымосос; 12 — швеллер; 13 — ковшовый элеватор просеив; 18 — вспомогательный дымосос

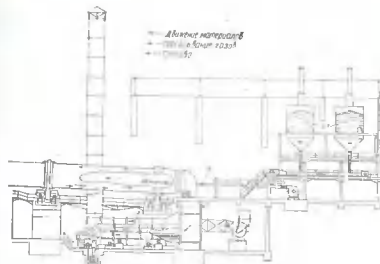
очередь, определяется интенсивностью смешивания топлива с воздухом. Указанная зависимость справедлива для всех видов топлива. Максимальная температура в зоне горения соответствует степени сгорания топлива, равной примерно 0,8.

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, требуются



с конвейером калцинизатором

1 — силос сырья; 2 — конвейер; 3 — ковшовый элеватор; 4 — бункер сырья; 5 — тарельчатый топливный кланкер; 10 — «горячий» камер; 11 — дымосос; 12 — швеллер; 13 — ковшовый элеватор просеив; 18 — вспомогательный дымосос

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 замедлять смешивание 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 наконечника 1 и распыляется во вращающейся печи. Расход мазута регулируют в некоторых пределах длины факела перемещением иглы 3. В тангенциальной форсунке мазут распыляется по тангенциальному направлению к соплу 1, в результате создаются более благоприятные условия смещения капель мазута с воздухом. Форму факела и его длину регулируют перемещением поршня 2 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—400 м/с и интенсивное смешение газа с воздухом. Обычно такие горелки снабжают устрой-

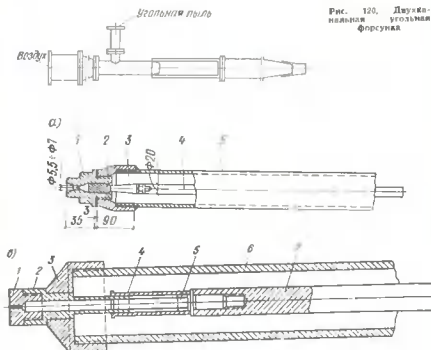


Рис. 121. Газовые форсунки

а — угольная; 1 — сопло; 2 — завихритель; 3 — иголка; 4 — стержень; 5 — корпус; 6 — тангенциальная; 7 — сопло; 8 — камера завихрения; 9 — головка форсунки; 10 — стакан; 11 — поршень; 12 — труба диаметром 60 мм; 13 — прут диаметром 20 мм

ствами, которые позволяют регулировать глубину вытяжения и угол наклона горелки. Это дает возможность управлять в некоторых пределах расположением зоны горения и, следовательно, зоны спекания 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 изменить положение, длину и температуру факела независимо от расхода газа и избытка воздуха.

У регулируемых горелок таких недостатков нет, так как они оборудованы устройствами, позволяющими изменить 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). Горелка ГВП снабжена устройством, позволяющим менять площадь сечения устья в результате перемещения сердечника и стенок завихрителя с помощью тангенциально установленных лопаток. Проникнув в область

Рис. 120. Двухканальная угольная форсунка

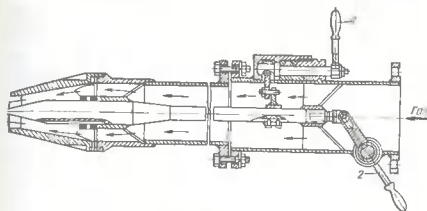


Рис. 122. Горелка ГВП

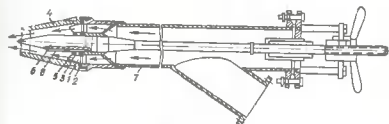


Рис. 123. Горелка ВРГ

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.

Отличительная 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 клинкера 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 отфурованы броневыми жаростойкими плитами из чугуна. Для интенсификации процесса охлаждения плиты имеют выступающие ребра, которые усиливают перемешивание слоя клинкера. В разгрузочной части рекуператоры снабжены полками для интенсивного пересыпания клинкера по высоте рекуператора. Иногда к полкам подвешивают короткие цепи, которые дополнительно улучшают процесс охлаждения. Рекуператоры соединены с 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 перепалывающие 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 недоступно 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 рамах крепят 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 грохот. Мелкий клинкер проваливается в бункер

и поступает на конвейер, а крупный клинкер по колосникам поступает в дробилку, затем на конвейер.

Просыпь клинкера через отверстия в подвижных и неподвижных колосниках собирается на дне с центым конвейером подается в бункер. Воздух из первой камеры поступает по патрубку, затем, пройдя через слой горячего клинкера нагретым, подается во вращающуюся печь для сжигания топлива.

Во вторую камеру воздуха по патрубку проходит через слой клинкера, уже частично охлажденного, и направляется на сброс в трубу, предварительно очищенный от пыли в циклоне. Воздух из второй камеры отсасывается специально предназначенным для этого вентилятором.

Холодильник заключен в металлический герметизированный корпус, отфурованный в верхней половине шланговым присоединением для снижения потерь тепла в окружающую среду. В колосниковых холодильниках достигается быстрое и эффективное охлаждение клинкера до 40—50°С. Охлажденный клинкер направляется непосредственно в измельчное 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 СХ» с двойным прососом 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 увлекаются 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 вентилятором среднего давления.

Воздух, пройдя через слой клинкера в холодной камере холодильника, нагревается до температуры 180°С, очищается от пыли в пылеулавливающем устройстве и затем пылесосом подается под колосниковую решетку горячей зоны холодильника. Вторично пройдя через слой более горячего клинкера, воздух дополнительно нагревается и поступает в печь с температурой 500—650°С.

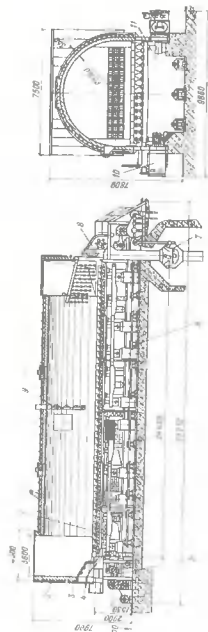


Рис. 124. Колосниковый агрегат с конвейером «Волга-125 СУ». Разрезом: 1 — основной колосниковый агрегат; 2 — конвейер; 3 — дробилка; 4 — колосниковая решетка; 5 — привод колосниковой решетки; 6 — основной колосниковый агрегат; 7 — конвейер; 8 — дробилка; 9 — колосниковая решетка; 10 — патрубок подачи воздуха; 11 — подбетонное пространство.

С помощью специальной системы жалюзийных затворов можно регулировать количество и температуру воздуха, подаваемого вначале под колосниковую 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 производственных затрат электроэнергии на привод дробилки клинкер предварительно классифицируют по фракциям. Мелкие фракции клинкера непосредственно поступают на конвейер. Для удаления просыпи клинкера из подбетонного пространства предусмотрены скребковые конвейеры.

Техническая характеристика холодильника «Волга-125 СУ»

Производительность, т/ч	125
Полезная площадь колосниковой 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—650
Масса (без футеровки), т	514
Общая мощность электрооборудования, 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 незначительно отличается от принципа работы колосниковых переталкивающих холодильников. Слой клинкера в этом холодильнике перемещается в результате движения бесконечной конвейерной ленты, собранной из дырчатых паллет. Преимуществом этих холодильников по сравнению с колосниковыми 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.

ТЯГО-ДУТЬЕВЫЕ УСТРОЙСТВА

Для подачи во вращающиеся печи первичного воздуха, который обычно должен быть транспортирующим агентом для пылеугольного топлива или для продувки слоя клинкера на колосниковой 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

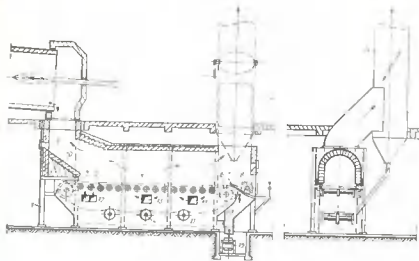


Рис. 125. Холодильная с конвейерной решеткой

1 — корпус, 2 — роликовый конвейер, 3 — конвейерная бесконечная решетка, 4 — опорные ролики, 5, 6 — воздушные роликсы, 7 — направляющая плита; 8 — молотовая дробилка; 9 — шнек, 10 — тельца клинкера; 11 — конвейер для удаления просины; 12 — воздушный канал «горячей» камеры; 13 — воздушные каналы «холодной» камеры; 14 — труба; 15 — конвейер для подачи клинкера на склад

должны выбираться с запасом до 30% относительно расчетных значений.

Для создания тяги, г. е. транспортирования газового потока по печному тракту, применяются дымососы. Это тоже центробежные вентиляторы, характеристики которых рассчитаны на рабочую температуру 200° С. Полный напор вентилятора должен обеспечивать преодоление сопротивления печного тракта, включая сопротивление пластинчатых или барабанных холодильников. В случае применения колосниковых или иных типов холодильников клинкера, работающих с поддувом воздуха, дымосос должен обеспечивать разрежение 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 дозирования и стабильность питания.

Принцип работы питателя следующий (рис. 126): шлам по трубопроводу 3 поступает в корпус 4, где поддерживается постоянный

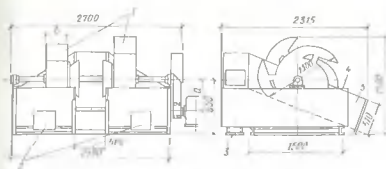


Рис. 126. Ковшовый питатель шлама Разрезом

1 — ковш, 2 — слив шлама, 3 — шламочный трубопровод, 4 — корпус, 5 — наклонная течка

уровень шлама за счет его слива по трубопроводам 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, время заполнения которого фиксируется по электросекундомеру.

В отечественной промышленности наряду некоторым распространением реактивные питатели шлама, которые обеспечивают более высокую стабильность питания печей шлагом.

Для печей сухого способа производства стабильность питания сухой сырьевой смесью имеет еще большее значение, чем для печей мокрого способа производства. Как известно, технологический режим работы печей с циклонными теплообменниками весьма критичен к равномерности питания сырьевой смесью. Поэтому в качестве питателей в этих случаях используют весовые дозаторы с автоматическим регулированием производительности.

§ 29. МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВЫЙ 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 топлива, 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. Составлению теплового баланса предшествует расчет

удельных материальных потоков, соотношение которых представляет собой материальный баланс процесса обжига.

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС

ПРИХОДНЫЕ СТАТЬИ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

1. Выход клинкера 1 кг

В инженерных расчетах цементнообжигательных 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 , кг/кг клинкера, из сырьевой смеси

$$G_{\text{CO}_2}^{\text{с}} = \frac{\text{CO}_2}{100} [G_c^{\text{с}} + (G_c - G_c^{\text{с}}) \beta], \quad (95)$$

где $G_{\text{CO}_2}^{\text{с}}$ — содержание связанного в карбонатах сухой сырьевой смеси углекислого газа, %;

$$\text{CO}_2 = \frac{M_{\text{CO}_2} \cdot \text{CaO}^{\text{с}}}{M_{\text{CaO}}} + \frac{M_{\text{CO}_2} \cdot \text{MgO}^{\text{с}}}{M_{\text{MgO}}}, \quad (96)$$

где M_{CO_2} , M_{CaO} , M_{MgO} — молекулярные массы, β — степень полноты декарбонизации безвозвратного уноса (обычно в расчете принимают равной 0,5), $\text{CaO}^{\text{с}}$, $\text{MgO}^{\text{с}}$ — содержание окиси кальция и окиси магния в сухой сырьевой смеси, % (принимают по данным химического анализа сырьевой смеси),

или $\text{м}^3/\text{кг}$ клинкера

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{с}} = G_{\text{CO}_2}^{\text{с}} / \gamma_{\text{CO}_2}.$$

3. Выход влаги из сырьевой смеси:

а) физическая влага, кг/кг клинкера,

$$\text{или } \text{м}^3/\text{кг} \text{ клинкера,} \quad \left. \begin{aligned} G_w^{\text{ф}} &= G_{\text{св}} - G_{\text{с}}, \\ V_w^{\text{ф}} &= G_w^{\text{ф}} / \gamma_{\text{в}} \text{ в.} \end{aligned} \right\} \quad (97)$$

б) химически связанной (гидратной) влаги, кг/кг клинкера,

$$\text{или } \text{м}^3/\text{кг} \text{ клинкера,} \quad \left. \begin{aligned} G_w^{\text{х}} &= 0,0035 G_{\text{с}} \Lambda_{\text{с}}^{\text{с}}, \\ V_w^{\text{х}} &= G_w^{\text{х}} / \gamma_{\text{в}} \text{ в.} \end{aligned} \right\} \quad (98)$$

4. Безвозвратный унос пыли из сырьевой смеси, кг/кг клинкера,

$$G_{\text{ш}}^{\text{б}} = (G_{\text{с}} - G_{\text{с}}^{\text{с}}) [1 - (\text{п.п.п.})^{\text{с}}] \text{ в } [10^{-2}], \quad (99)$$

где $(\text{п.п.п.})^{\text{с}}$ — потери массы сырьевой смеси при прокалывании, %

5. Выход отходящих газов:

а) выход топочных газов при сгорании твердого и жидкого топлива, м^3 (V) или кг (G) на 1 кг топлива:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{CO}_2}^{\text{т}} &= 0,0187 \text{ СР}; \quad G_{\text{CO}_2}^{\text{т}} = V_{\text{CO}_2}^{\text{т}} \gamma_{\text{CO}_2}^{\text{т}}; \\ V_{\text{SO}_2}^{\text{т}} &= 0,007 \text{ С}; \quad G_{\text{SO}_2}^{\text{т}} = V_{\text{SO}_2}^{\text{т}} \gamma_{\text{SO}_2}^{\text{т}}; \\ V_{\text{N}_2}^{\text{т}} &= 0,79 V_{\text{в}} + 0,08 \text{ МР}; \quad G_{\text{N}_2}^{\text{т}} = V_{\text{N}_2}^{\text{т}} \gamma_{\text{N}_2}^{\text{т}}; \\ V_{\text{O}_2}^{\text{т}} &= 0,21 (\alpha - 1) V_{\text{в}}; \quad G_{\text{O}_2}^{\text{т}} = V_{\text{O}_2}^{\text{т}} \gamma_{\text{O}_2}^{\text{т}}. \end{aligned} \right\} \quad (100)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{т}} = 0,112 \text{ НР} + 0,0124 \text{ МР}; \quad G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{т}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{т}} \gamma_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{т}}.$$

б) выход топочных газов при сгорании газообразного топлива, м^3 на 1 м^3 горячего газа:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{CO}_2}^{\text{г}} &= 0,01 [\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + n(\text{C}_m \text{H}_n)]; \\ V_{\text{N}_2}^{\text{г}} &= 0,79 V_{\text{г}} + 0,01 \text{ Н}; \\ V_{\text{O}_2}^{\text{г}} &= 0,21 (\alpha - 1) V_{\text{г}}; \\ V_{\text{SO}_2}^{\text{г}} &= 0,01 \text{ N-С}; \\ V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{г}} &= 0,01 \left(\text{H}_2 + 2 \text{CH}_4 + \frac{n}{2} \text{C}_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \right); \end{aligned} \right\} \quad (101)$$

в) суммарный выход топочных газов, м^3 или кг на 1 кг клинкера:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{с.г}}^{\text{т}} &= V_{\text{CO}_2}^{\text{т}} + V_{\text{SO}_2}^{\text{т}} + V_{\text{N}_2}^{\text{т}} + V_{\text{O}_2}^{\text{т}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{т}}; \\ G_{\text{с.г}}^{\text{т}} &= G_{\text{CO}_2}^{\text{т}} + G_{\text{SO}_2}^{\text{т}} + G_{\text{N}_2}^{\text{т}} + G_{\text{O}_2}^{\text{т}} + G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{т}}. \end{aligned} \right\} \quad (102)$$

г) общий выход отходящих газов из топлива и сырья, м^3 кг клинкера,

$$V_{\text{с.г}}^{\text{т}} = V_{\text{с.г}}^{\text{т}} x^{\text{т}} + V_{\text{с.г}}^{\text{с}} + V_w^{\text{ф}} + V_w^{\text{х}} + V_{\text{ш}}^{\text{б}}, \quad (103)$$

где $V_w^{\text{в}} = G_w^{\text{в}} / \gamma_{\text{в}}^{\text{в}}$ — расход влаги воздуха ($G_w^{\text{в}} = G_{\text{в}} x^{\text{в}} \frac{d}{1000}$); d — влагосодержание 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,

$$G_{\text{зн}}^{\text{з}} = [(1 - \alpha) x^{\text{т}} \text{ АР}] / 100, \quad (104)$$

где α — доля золы топлива, осевшая в печи

В целом безвозвратный унос пыли, кг/кг клинкера, будет равен

$$G_{\text{ш}}^{\text{б}} = G_{\text{ш}}^{\text{с}} + G_{\text{зн}}^{\text{з}}, \quad (105)$$

РАСХОДНЫЕ СТАТЬИ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА

1. Расход топлива x^T , кг/клинкера или m^3 /кг клинкера, при расходе 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

$$G_c = G_c^T \cdot 100 / (100 - a_{yn}); \quad (106)$$

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_{yn} — унос сырья, % от расхода сухого сырья; W_c — влажность шлама, %; $G_c^T = (100 - a_{yn} G_c A^T) / (100 - (p.l.n)^T)$.

(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 /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 /м³ газа

$$V_0 = \frac{1}{2x} \left[2 CH_4 + 0,5 H_2 + 0,5 CO + \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 1,5 H_2 S - O_2 \right]. \quad (109)$$

4. Действительный расход сухого воздуха, m^3 или кг/кг топлива:

$$V_B = V_0 \alpha; \quad G_B = V_B \gamma_B. \quad (110)$$

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

$$q = x^T Q_{\text{н}}^P. \quad (111)$$

2. Приход с физической теплотой топлива

$$Q_{\text{ф}}^T = x^T c_T t_T. \quad (112)$$

3. Приход с физической теплотой сырья

$$Q_c = (G_c c_c - G_{\text{ш}}^{\text{ф}}) t_c. \quad (113)$$

4. Приход с физической теплотой воздуха:

а) с первичным воздухом

$$Q_{\text{п}}^P = x^T V_{\text{п}} K_{\text{п}} \rho_{\text{п}}^P. \quad (114)$$

б) с вторичным воздухом

$$Q_{\text{в}}^P = x^T V_{\text{в}} (1 - k) c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}^P. \quad (115)$$

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 клинкера:

1. 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, 0°С. Следовательно, теоретический расход теплоты на обжиг представляет собой алгебраическую сумму теплот физико-химических превращений в сырьевой смеси в процессе обжига. Методика расчета теоретического эффекта клинкерообразования изложена в [9, 10].

2. Расход теплоты на испарение влаги из сырьевой смеси

$$Q_{\text{ш}}^C = G_{\text{ш}}^{\text{ф}} Q_{\text{н}}. \quad (116)$$

где $Q_{\text{н}}$ — теплота парообразования при 0°С, кДж/кг влаги.

3. Потери теплоты с отходящими газами

$$Q_{\text{ог}} = [(XV^T) x^T + \Sigma V^T] t_{\text{ог}}, \quad (117)$$

где ΣV^T — сумма компонентов отходящих газов в результате сжигания топлива, m^3 /кг топлива; ΣV^T — сумма компонентов отходящих газов в результате декарбонизации сырьевой смеси и сушки ее, m^3 /кг клинкера.

4. Потери теплоты с клинкером, выходящим из холодильника.

$$Q_{\text{кл}} = c_{\text{кл}} t_{\text{кл}}. \quad (118)$$

где $c_{\text{кл}}$ — теплоемкость клинкера, кДж/(кг · К); $t_{\text{кл}}$ — температура клинкера на выходе из холодильника, °С.

5. Потери теплоты с пылеуносом

$$Q_{\text{ун}} = G_{\text{ун}} c_{\text{ун}} t_{\text{ог}}. \quad (119)$$

6. Потери теплоты корпусом печи в окружающую среду.

Потери теплоты корпусом печи в окружающую среду при хорошем состоянии огнеупорной футеровки составляют 15 — 30% удельного расхода теплоты на обжиг

$$Q_{\text{о.с}} = (0,15 - 0,3) x^T. \quad (120)$$

Приведенная формула может быть использована только для приблизительных расчетов. Более точный расчет тепловых потерь корпу-

сом печи в окружающую среду следует проводить по специальным методикам [9, 10].

На основании приведенных расчетов, приведенных статей теплового баланса можно составить уравнение теплового баланса и определить удельный расход топлива на процесс обжига.

Уравнение теплового баланса в общем виде будет иметь вид

$$\Sigma Q_{\text{прит}} - \Sigma Q_{\text{расс}}; \quad (121)$$

или в развернутом виде

$$Q_{\text{т}}^{\text{пр}} - Q_{\text{т}}^{\text{р}} - Q_{\text{с}}^{\text{пр}} - Q_{\text{с}}^{\text{р}} - Q_{\text{с}}^{\text{т}} - Q_{\text{с}}^{\text{л}} - Q_{\text{с}}^{\text{н}} - Q_{\text{с}}^{\text{у}} - Q_{\text{с}}^{\text{в}}; \quad (122)$$

Из формулы (122) можно определить удельный расход топлива x .

Результаты расчетов по тепловому балансу сводят в таблицу, которая наглядно иллюстрирует структуру теплового баланса.

§ 30. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Тепловая эффективность работы печного агрегата характеризуется тепловым и технологическим 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 к полезно затраченной теплоте относят теплоту, затраченную на теоретический эффект клинкерообразования и испарение физической влаги сырья, а во втором — только на теоретический эффект клинкерообразования.

Тепловой коэффициент полезного действия η_t , %

$$\eta_t = \frac{(Q_{\text{т}}^{\text{т}} + Q_{\text{с}}^{\text{с}})}{\Sigma Q_{\text{пр}}} 100. \quad (123)$$

Технологический коэффициент полезного действия $\eta_{\text{т}}$, %

$$\eta_{\text{т}} = (Q_{\text{т}}^{\text{т}} / Q) 100. \quad (124)$$

§ 31. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОЙ 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 провести 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 (КДж/кг клинкера).

Следовательно, из выражения (125) следует, что тепловая мощность полностью определяет производительность вращающейся печи при заданном удельном расходе теплоты на обжиг. Нетрудно заметить, что улучшение использования 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 топлива. Если топочный объем обозначить V , м³, а объемное тепловое напряжение горения топлива q_v , то тепловая мощность печи может быть определена по выражению:

$$Q = Vq_v. \quad (126)$$

Обычно объемное тепловое напряжение горения топлива во вращающейся печи находится в пределах 0,31—0,35 ГВт/м³.

Статистическая обработка показателей работы вращающихся печей позволяет установить эмпирическую связь между тепловой мощностью вращающейся печи и диаметром ее в зоне горения топлива; указанная зависимость имеет вид

$$Q = KD^3, \quad (127)$$

где K — коэффициент, равный для печей мокрого способа 1,1, для печей сухого способа 0,4—0,5; D — диаметр печи, м.

Пользуясь формулами (125) — (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, м

$$L_t \approx (4-5) D; \quad (128)$$

для печей сухого способа обжига

$$L_t \approx (2-4) D. \quad (129)$$

Полученные в результате расчетов основные данные по удельному расходу топлива, выходу отходящих газов, расходу воздуха, давлению, дают возможность определить соответствующие

часовые расходы и выходы. Расчет гидравлического сопротивления вращающихся печей и комплектующего оборудования можно выполнять по методике, изложенной в [9, 10].

На основании проведенных расчетов можно произвести выбор типа вспомогательного оборудования (тягодутьевых устройств, холодильников клинкера, пылесосных 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 прососом 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 пылеулавливающих устройств. Кроме того, особенно большое значение на эффективность работы пылеочистных 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 уделять 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 обеспыливания отходящих из печи газов применяют электрофильтры, которые обеспечивают степень очистки газов до допустимой 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 выпрявленным током высокого напряжения, газораспределительные устройства и механизм встряхивания электродов.

Характеристика электрофильтров типа УГТ, применяемых для обеспыливания газов с температурой 250—450°С, по данным Гипрогазоочистки, приведена в табл. 17.

Таблица 17. Характеристика электрофильтров

Типоразмер	Число		Активное сечение, м ²	Площадь поверхности осаждения, м ²	Активная длина электро-дов, м	Габариты (без диффузора и конфузора)	
	толов	газовых проходов				длина, м	ширина, м
УГТ-1-130-3	3	16	30	1843	7,5	14	4,5
УГТ-1-40-3	3	22	40	2509	7,5	14	6
УГТ-1-60-3	3	33	60	3727	7,5	14	9
УГТ-1-80-3	3	44	80	4945	7,5	14	12

Среднюю скорость газов в активной зоне электрофильтров следует принимать для вращающихся печей мокрою и полусухого способов производства не более 1,2 м/с и для печей сухого способа производства не более 0,8 м/с.

Для обеспыливания запыленного воздуха колосниковых холодильников применяют рукавные тканевые фильтры, а в последнее время — фильтры с насыщенным зернистым слоем в сочетании с циклонами.

§ 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 тонкоизмельченной сырьевой смеси и короткопламенного твердого топлива с последующим брикетированием слегка увлажненной массы.

Шахтная печь (рис. 127) состоит из цельносварного корпуса 1, футерованного в верхней, наиболее горячей части огнеупорным кирпичом 2, а в нижней, наиболее подверженной абразивному действию цементного клинкера, чугунными козылками 3. Разгрузку цементного клинкера производят в нижней части шахты с помощью разгрузочного устройства 4, которое выполнено в виде колосниковой вращающейся решетки. Клинкер, отделенный колосниковой решеткой, поступает в трехшлюзовый затвор 5, назначение которого заключается в предотвращении потерь сжатого воздуха, поступающего по трубопроводу 6 от грубоовоздуховодки.

Для интенсификации горения топлива и более качественного распределения спекания клинкера по сечению шахты применяется фурименное дутье 7. Воздух нагнетается под колосниковую решетку под давлением 1500—2000 кПа. В верхней части печи устанавливается разгрузочное устройство, которое одновременно обеспе-

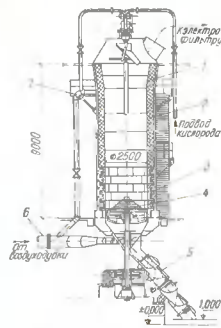


Рис. 37. Автоматическая шахтная печь

более выгодное качество извести, однако удельный расход топлива несколько выше, чем при использовании твердого топлива. Подробное описание конструкции шахтных известеобжигательных печей дано в книге Д. Я. Мазурова [24].

§ 34. 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 централизованным управлении обязательно применяются автоматическая предпусковая синхронизация и блокировка взаимосвязанных механизмов, аварийная синхронизация;

обеспечение равномерности распределения сырьевых брикетов по сечению шахты.

Шахтные печи чаще всего применяют в производстве обжига известняка на известь. Основная часть известеобжигательных печей использует твердое топливо (топливо уголь, антрацит и реже кокс), которое загружают в печь подобно с кусками известняка. Причем куски известняка в 2—3 раз меньше, чем куски топлива. Это соотношение размеров кусков топлива и известняка выбирается из условия одинакового времени выгорания топлива и декарбонизации известняка.

В последние годы начинают находить применение шахтные печи для обжига известки с использованием природного горючего газа.

На этих печах достигается

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 обуславливается 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 возмущений процесса. Это вызывает определенные противоречия в требованиях управления процессом, например в зоне сгорания и зоне подготовки.

Основные возмущения процесса обжига клинкера, определяющие характер его протекания, вызываются изменениями качества шлама, его расхода, изменениями в соотношении топлива 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 максимальную возможную стабилизацию определенной части возмущающих факторов, а для остальных устанавливают допустимые пределы отклонений, при которых не наблюдается растроя хода печи.

Расход шлама регулируется изменением частоты вращения копирового шламowego 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 измерения этой температуры в трех основных технологических зонах печи: сушки, кальцинирования и спекания. Для стабилизации температурного режима применяют два регулируемых устройства путем изменения подачи топлива 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 пылесадительной камере. Регулируют ее путем воздействия на жалюзийный шибер или на направляющий аппарат дымохода.

Регулятор температуры материала в зоне кальцинирования поддерживает заданное соотношение между показаниями термопары и расходом топлива.

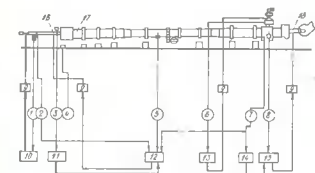


Рис. 128. Блок-схема автоматической стабилизации основных параметров температурного режима печи и отходящего воздуха

1 — давление газа; 2 — расход газа; 3 — температура в зоне спекания; 4 — масса газа; 5 — температура в зоне кальцинирования; 6 — расход шлама; 7 — содержание кислорода в отходящем газе; 8 — температура отходящих газов; 9 — истинная температура; 10 — 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 — температурный датчик; 17 — датчик; 18 — жалюзийный шибер; 19 — датчик; 20 — датчик; 21 — датчик; 22 — датчик; 23 — датчик; 24 — датчик; 25 — датчик; 26 — датчик; 27 — датчик; 28 — датчик; 29 — датчик; 30 — датчик; 31 — датчик; 32 — датчик; 33 — датчик; 34 — датчик; 35 — датчик; 36 — датчик; 37 — датчик; 38 — датчик; 39 — датчик; 40 — датчик; 41 — датчик; 42 — датчик; 43 — датчик; 44 — датчик; 45 — датчик; 46 — датчик; 47 — датчик; 48 — датчик; 49 — датчик; 50 — датчик; 51 — датчик; 52 — датчик; 53 — датчик; 54 — датчик; 55 — датчик; 56 — датчик; 57 — датчик; 58 — датчик; 59 — датчик; 60 — датчик; 61 — датчик; 62 — датчик; 63 — датчик; 64 — датчик; 65 — датчик; 66 — датчик; 67 — датчик; 68 — датчик; 69 — датчик; 70 — датчик; 71 — датчик; 72 — датчик; 73 — датчик; 74 — датчик; 75 — датчик; 76 — датчик; 77 — датчик; 78 — датчик; 79 — датчик; 80 — датчик; 81 — датчик; 82 — датчик; 83 — датчик; 84 — датчик; 85 — датчик; 86 — датчик; 87 — датчик; 88 — датчик; 89 — датчик; 90 — датчик; 91 — датчик; 92 — датчик; 93 — датчик; 94 — датчик; 95 — датчик; 96 — датчик; 97 — датчик; 98 — датчик; 99 — датчик; 100 — датчик.

регулятор температуры 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 — температурный датчик; 17 — датчик; 18 — жалюзийный шибер; 19 — датчик; 20 — датчик; 21 — датчик; 22 — датчик; 23 — датчик; 24 — датчик; 25 — датчик; 26 — датчик; 27 — датчик; 28 — датчик; 29 — датчик; 30 — датчик; 31 — датчик; 32 — датчик; 33 — датчик; 34 — датчик; 35 — датчик; 36 — датчик; 37 — датчик; 38 — датчик; 39 — датчик; 40 — датчик; 41 — датчик; 42 — датчик; 43 — датчик; 44 — датчик; 45 — датчик; 46 — датчик; 47 — датчик; 48 — датчик; 49 — датчик; 50 — датчик; 51 — датчик; 52 — датчик; 53 — датчик; 54 — датчик; 55 — датчик; 56 — датчик; 57 — датчик; 58 — датчик; 59 — датчик; 60 — датчик; 61 — датчик; 62 — датчик; 63 — датчик; 64 — датчик; 65 — датчик; 66 — датчик; 67 — датчик; 68 — датчик; 69 — датчик; 70 — датчик; 71 — датчик; 72 — датчик; 73 — датчик; 74 — датчик; 75 — датчик; 76 — датчик; 77 — датчик; 78 — датчик; 79 — датчик; 80 — датчик; 81 — датчик; 82 — датчик; 83 — датчик; 84 — датчик; 85 — датчик; 86 — датчик; 87 — датчик; 88 — датчик; 89 — датчик; 90 — датчик; 91 — датчик; 92 — датчик; 93 — датчик; 94 — датчик; 95 — датчик; 96 — датчик; 97 — датчик; 98 — датчик; 99 — датчик; 100 — датчик.

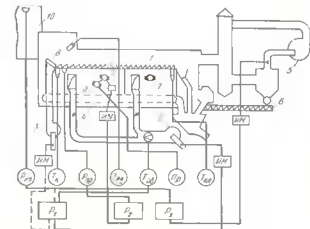


Рис. 129. Блок-схема автоматического контроля и регулирования процесса кальцинирования шлама типа «Волга»

1 — температура газа; 2 — расход газа; 3 — температура в зоне спекания; 4 — масса газа; 5 — температура в зоне кальцинирования; 6 — расход шлама; 7 — содержание кислорода в отходящем газе; 8 — температура отходящих газов; 9 — истинная температура; 10 — 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 — температурный датчик; 17 — датчик; 18 — жалюзийный шибер; 19 — датчик; 20 — датчик; 21 — датчик; 22 — датчик; 23 — датчик; 24 — датчик; 25 — датчик; 26 — датчик; 27 — датчик; 28 — датчик; 29 — датчик; 30 — датчик; 31 — датчик; 32 — датчик; 33 — датчик; 34 — датчик; 35 — датчик; 36 — датчик; 37 — датчик; 38 — датчик; 39 — датчик; 40 — датчик; 41 — датчик; 42 — датчик; 43 — датчик; 44 — датчик; 45 — датчик; 46 — датчик; 47 — датчик; 48 — датчик; 49 — датчик; 50 — датчик; 51 — датчик; 52 — датчик; 53 — датчик; 54 — датчик; 55 — датчик; 56 — датчик; 57 — датчик; 58 — датчик; 59 — датчик; 60 — датчик; 61 — датчик; 62 — датчик; 63 — датчик; 64 — датчик; 65 — датчик; 66 — датчик; 67 — датчик; 68 — датчик; 69 — датчик; 70 — датчик; 71 — датчик; 72 — датчик; 73 — датчик; 74 — датчик; 75 — датчик; 76 — датчик; 77 — датчик; 78 — датчик; 79 — датчик; 80 — датчик; 81 — датчик; 82 — датчик; 83 — датчик; 84 — датчик; 85 — датчик; 86 — датчик; 87 — датчик; 88 — датчик; 89 — датчик; 90 — датчик; 91 — датчик; 92 — датчик; 93 — датчик; 94 — датчик; 95 — датчик; 96 — датчик; 97 — датчик; 98 — датчик; 99 — датчик; 100 — датчик.

зуде вторичного воздуха; $G_{\text{га}}$ — расход общего воздуха; $P_{\text{г}}$ — число ходов решетки; $T_{\text{га}}$ — температура газа; $P_{\text{г}}$ — регулятор общего расхода воздуха; $P_{\text{г}}$ — регулятор давления под решеткой; $P_{\text{г}}$ — регулятор разрежения в горячей газовой печи; $P_{\text{г}}$ — дополнительный измеритель.

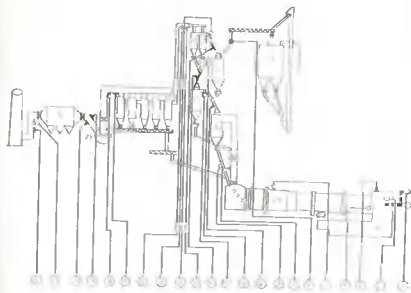


Рис. 130. Схема автоматического контроля параметров процесса в печи с газосжигательным агрегатом

1 — расход газа; 2 — радиационный измеритель; 3 — разрежение в горячей газовой печи; 4 — температура вторичного воздуха; 5 — температура в зоне кальцинирования; 6 — расход сырья; 7, 9, 12—14 — переключатели давления в циклонах; 8 — температура материала на входе в реактор; 10, 11, 15 — температура в зоне спекания; 16 — температура газа; 17, 18 — давление и температура в зоне спекания; 19, 20 — давление и содержание кислорода после дымового датчика; 21, 22 — давление и температура после электрофильтра; 23 — радиационный датчик; 24 — датчик; 25 — датчик; 26 — датчик; 27 — датчик; 28 — датчик; 29 — датчик; 30 — датчик; 31 — датчик; 32 — датчик; 33 — датчик; 34 — датчик; 35 — датчик; 36 — датчик; 37 — датчик; 38 — датчик; 39 — датчик; 40 — датчик; 41 — датчик; 42 — датчик; 43 — датчик; 44 — датчик; 45 — датчик; 46 — датчик; 47 — датчик; 48 — датчик; 49 — датчик; 50 — датчик; 51 — датчик; 52 — датчик; 53 — датчик; 54 — датчик; 55 — датчик; 56 — датчик; 57 — датчик; 58 — датчик; 59 — датчик; 60 — датчик; 61 — датчик; 62 — датчик; 63 — датчик; 64 — датчик; 65 — датчик; 66 — датчик; 67 — датчик; 68 — датчик; 69 — датчик; 70 — датчик; 71 — датчик; 72 — датчик; 73 — датчик; 74 — датчик; 75 — датчик; 76 — датчик; 77 — датчик; 78 — датчик; 79 — датчик; 80 — датчик; 81 — датчик; 82 — датчик; 83 — датчик; 84 — датчик; 85 — датчик; 86 — датчик; 87 — датчик; 88 — датчик; 89 — датчик; 90 — датчик; 91 — датчик; 92 — датчик; 93 — датчик; 94 — датчик; 95 — датчик; 96 — датчик; 97 — датчик; 98 — датчик; 99 — датчик; 100 — датчик.

Регулятор температуры зоны спекания предназначен для стабилизации качества обжига клинкера. Датчиком является измеритель, 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 взаимосвязанно друг с другом. Поэтому начальные задания регуляторам задаются по данным теплотехнических испытаний вращающейся печи, работа которой в этот период должна находиться в режиме, близком к оптимальному. При этом долж-

