

## **Введение. Классификация тепловых установок.**

Целью данной дисциплины является изучение принципов работы основных тепловых установок и агрегатов производства вяжущих материалов и изделий на их основе, особенностей их конструкции и организации режима их работы.

Задачи дисциплины:

- 1) научиться анализировать режим работы тепловых установок и определить пути их совершенствования;
- 2) научиться проводить теплотехнические расчеты тепловых установок;
- 3) приобрести необходимые технологические знания и навыки для рациональной организации тепловых процессов в теплотехнических установках и агрегатах.

Данная дисциплина является одной из 4-х основных по специальности и тесно связана с дисциплинами «Химическая технология вяжущих веществ», «Оборудование и основы проектирования». Дисциплина включает в себя изучение теплотехнических установок, которые используются в технологических процессах, доля затрат теплоты в которых в структуре себестоимости составляет от 30 до 70%. Это определяет особую актуальность ее изучения.

Широкое применение в технологии вяжущих веществ и изделий на их основе тепловой обработки обуславливает наличие широкого разнообразия теплотехнических установок.

Они классифицируются по принципу действия, технологическому назначению, теплотехническим особенностям и конструктивным признакам. Классификация теплотехнических установок по технологическому назначению и конструктивным особенностям может быть представлена в виде схемы.

Шахтные печи появились впервые в 1802 г., в России – в 1865 на Рижском заводе. В конце 19 в. появилась шахтная печь непрерывного действия. В таких печах получали известь и цементный клинкер. Вращающиеся печи впервые были использованы в Англии в 1885 г., в России – в 1906 г., у нас в стране – в 1914 г. в Волковысском районе. Автоклавы для производства силикатного кирпича стали применяться в 1880 г. в Германии.

Пути совершенствования теплотехнических установок производства вяжущих веществ и изделий на их основе:

- 1) совмещение отдельных тепловых процессов в один общий процесс (например, сушку и обжиг);
- 2) совершенствование процесса сжигания топлива, конструкций горелочных устройств;
- 3) автоматизация работы теплотехнических установок;
- 4) снижение потерь теплоты в окружающую среду;
- 5) использование вторичных энергетических ресурсов;
- 6) создание теплообменников для использования низко потенциальной теплоты;
- 7) использование кислородного дутья.

## **Сушилки и типовые режимы их работы.**

Классификация сушилок:

- 1) по принципу действия:

- a. непрерывно действия;
- b. периодического действия;
- 2) по технологическому назначению:
  - a. для кусковых и порошкообразных материалов;
  - b. для суспензий;
  - c. для керамических изделий;
  - d. для листовых материалов;
- 3) по способу передачи теплоты (способу сушки):
  - a. конвективные;
  - b. радиационные;
  - c. высокочастотные;
  - d. контактные;
  - e. комбинированные
- 4) по схеме движения газов и материала:
  - a. прямоточные;
  - b. противоточные;
  - c. с рециркуляцией;
  - d. однозонные;
  - e. многозонные;
- 5) по конструкции:
  - a. барабанные;
  - b. пневматические;
  - c. распылительные;
  - d. с кипящим слоем;
  - e. размольно-сушильные;
  - f. камерные;
  - g. туннельные;
  - h. конвейерные.

#### Барабанная сушилка (сушильный барабан)

Предназначена для сушки кусковых и сыпучих материалов с влажностью более 2% - глины, песка, шлака, известняка, угля, а также для дегидратации гипсового камня. БС бывают прямоточные и противоточные. Схематическое изображение прямоточной БС представлено на рисунке:

Корпус БС выполнен в виде сварного стального цилиндра 2 с двумя бандажами 3, каждый из которых опирается на пару роликов 10. Толщина стенки

цилиндра – 10-14 мм, длина барабана 10-35 м, диаметр – 1,6-5 м, наклон – 2-4°, частота вращения 2-6 мин<sup>-1</sup>. Барабан приводится во вращение от электродвигателя 13, через редуктор 12, подвенцовое и венцовое зубчатое колесо, насаженное на корпус барабана.

Влажный материал с размером кусков до 40 мм подается через точку 6 в верхний конец барабана, перемещается по нему в результате его наклона и вращения и выгружается через разгрузочную камеру 1. Отработанные дымовые газы идут на очистку в циклон.

БС имеет вспомогательное оборудование: топочную камеру 7 с форсункой или горелкой 8, смесительную камеру 5 с каналом 9 для подсоса холодного воздуха, разгрузочную камеру 1, пылеулавливающее устройство для очистки отработанного сушильного агента и дымосос для создания движения газов. На торцах барабана установлены скользящие газуплотняющие устройства для сокращения подсоса окружающего воздуха.

Для улучшения теплообмена, равномерного распределения сушильного агента и материала по сушильному пространству барабана внутри установлены различные теплообменные устройства.

Для сушки материалов, налипающих на стенки барабана, применяют лопастные или цепные теплообменные устройства. При сушке сыпучих материалов ячейково-секторные. Могут использоваться комбинации этих устройств по длине барабана.

При прямоточной тепловой схеме сушильный агент вводится с загрузочного конца барабана и движется вместе с материалом. При противоточной схеме сушильный агент подается с разгрузочного конца барабана и направляется навстречу движущемуся материалу. В производстве вяжущих веществ применяют обе схемы. При сушке материалов, чувствительных к тепловому воздействию, используют прямоток, т.к. при противотоке высушенный материал будет контактировать с сушильным агентом с максимальной температурой. Это относится к сушке глины, гипса, угля. Противоток и прямоток можно представить в виде следующих схем.

Прямоточная схема

Противоточная схема

Достоинства прямотока:

- 1) более интенсивная сушка и максимальный паросъем вследствие достижения высокой разности температур сушильного агента и материала в начале сушки, когда влажность материала максимальна и он легко сушится;
- 2) возможность сушки материалов, чувствительных к воздействию теплоты;

3) возможность более быстрого придания материалу подвижность к транспортированию.

Недостатки:

1) повышенный пылеунос, что обуславливает нагрузку на аспирационную систему;

2) Большой расход топлива и ниже производительность по сравнению с противотоком.

Достоинства противотока:

1) расход топлива снижается на 10% за счет более полного использования теплоты;

2) повышение производительности сушилки на 25-30%;

3) за счет более равномерного распределения движущей силы процесса сушки (разности температур) его легче автоматизировать;

4) более низкий уровень пылеуноса за счет контакта дымовых газов на выходе с влажным материалом

Недостаток – невозможность использовать для сушки чувствительных материалов.

Температура сушильного агента при прямотоке на входе 900-1100°C, на выходе – 160-220°C; при противотоке на входе 700-850°C, на выходе – 120-140°C. Температура материала на выходе – 80-100°C.

БС характеризуются следующими технологическими показателями:

1) производительность – масса пропущенного за час материала. БС имеют производительность до 40 т/ч.

2) напряжение сушильного пространства по влаге – масса влаги, испаренной за 1 час в 1 м<sup>3</sup> сушильного пространства (кг/(м<sup>3</sup>·ч)). Напряжение барабана по влаге зависит от рода сушильного материала, влажности и начальной температуры сушки. Для песка оно составляет 80-100 кг/(м<sup>3</sup>·ч), для глины – 40-60 кг/(м<sup>3</sup>·ч);

3) расход теплоты на 1 кг испаряемой влаги. В БС он составляет 3600-5400 кДж/кг.

Достоинства БС:

1) высокая производительность;

2) надежность в работе;

3) возможность использования любого вида топлива;

4) легко автоматизируется.

Недостатки:

1) высокие капитальные затраты и расход производственных площадей;

2) недостаточно равномерная сушка кусковых материалов;

3) высокий расход теплоты.

### Пневматические сушилки

Пневматические сушилки предназначены для сушки мелкокусковых и сыпучих материалов (глины, песка, угля, торфа, гипса, известняка), с размером частиц до 20 мм. ПС являются сушилками конвективного типа. Существует много конструкций ПС, которые можно разделить на трубы – сушилки, в которых осуществляется только сушка, и сушильно – размольные агрегаты, где материал

одновременно сушится и измельчается. В последнем случае имеет место совмещение трубы – сушилки и помольных установок.

#### Схема трубы – сушилки.

Сушилка представляет собой вертикальную трубу 2 диаметром 500 – 1200 мм и высотой 8 – 20 м, в которых осуществляется сушка материала во взвешенном состоянии в течении 1 - 2с. Влажный, измельченный материал из бункера 4 питателем 3 подается в нижнюю часть трубы, в которую ниже места загрузки подается теплоноситель из топки или калорифера 1 с температурой 300 – 800 °С со скоростью 10 – 40 м/с. Из трубы отработанные влажные газы с температурой 100 – 150 °С вместе с высушенным материалом поступают в циклон 5, где происходит отделение частиц материала. Отработанный сушильный агент выбрасывается в атмосферу или поступает на дальнейшую очистку.

Материал перемещается по трубе восходящем потоком теплоносителя за счет вентилятора 6. Движение газов и материала в данном случае прямоточное. Для транспортирование материала восходящим потоком газов скорость его движения должна быть на 20 - 25% выше критической. При критической скорости движения материала его частицы находятся во взвешенном состоянии, сила их тяжести компенсируется подъемной силой потока газов.

При скорости ниже критической материал выпадает из потока газов. Критическая скорость зависит от диаметра частиц, плотности материала и плотности газов при данной температуре.

#### Схема пневматической сушильной – радиальной установки.

Перед подачей материала из бункера 1 через питатель 2 в трубу – сушилку 4 материал размалывается до расчетного размера в шахтной, молотковой или реже шаровой мельнице 3. Шахтные мельницы не требуют установки специального сепаратора, т.к. сама шахта обладает сепарирующим действием и выделяет из потока газов крупные частицы материала. Для поддержания

постоянной скорости газов по высоте шахты она может иметь вверху плавное сужение. Для совмещения помола и сушки теплоноситель из топки 5 подается непосредственно в мельницу. При этом интенсивность сушки повышается за счет непрерывного разрушения подсыхающих поверхностных слоев материала при помоле и дополнительной тепловой энергии, в которую превращается механическая работа дробящих молотков или шаров. (Около 80% энергии привода превращается в тепловую).

В некоторых случаях совмещенная с измельчением сушка может происходить до заданной конечной влажности непосредственно в мельнице. Тогда сушильная труба может отсутствовать.

Экспериментальные данные по пневматической сушке показывают, что пневмосушилки тем экономичнее, чем мельче частицы материала и чем больше они содержат свободной влаги. Оптимальный размер частиц материала при сушке в трубах – до 10 мм, начальная температура газов не ниже 600°C, конечная – 100 - 150°C, концентрация материала – 0,5 – 1,5 кг/кг газа. Сушку выгодно вести при скоростях газа, незначительно превышающих скорость витания частиц.

Напряжение объема трубы по влаге 400 – 500 кг/м<sup>3</sup>·ч, расход теплоты на 1 кг испаренной влаги – 4000 – 4500 кДж/кг.

Преимущества ПС – компактность, большая скорость сушки, высокий уровень автоматизации, равномерность сушки, невысокий расход теплоты.

Недостатки – интенсивный износ трубопроводов, высокий расход электроэнергии, необходимость громоздкой аспирационной системы для очистки газов перед выбросом в атмосферу.

#### Распылительные сушилки.

РС применяют для получения мелкодисперсного однородного порошка при сушке суспензий, эмульсий, шликера, шлама, пастообразных материалов с влажностью 30 – 50 %. Чаще всего применяется в производстве керамики. В производстве вяжущих веществ их применяют в качестве теплоутилизаторов вращающихся печей для сушки шлама, в т.ч. и мелового для получения кормового и строительного мела. Сушилка также конвективного типа.

#### Схема распылительной сушилки.

РС представляет собой башню с отношением высоты к диаметру 1,1 – 1,2. Высота башни достигает 15 – 25 м. Принцип действия РС в тонком распылении суспензии с помощью форсунок, преимущественно центробежных, в среде горячих

газов. Распыление осуществляется до размера капель 0,5 – 1 мм. Благодаря большой удельной поверхности распыленного материала процесс испарения влаги происходит интенсивно. Сушка шламов в распылительных сушилках состоит из трех этапов: распыление исходного материала до капель с размером в несколько десятков микрометров; смешивание капель с теплоносителем; быстрое испарение влаги материала с выделением сухого материала в нижнюю часть сушильной камеры. РС отличаются способом распыления шлама. Оно осуществляется с помощью форсунок либо вращающихся дисков. Форсунки работают под давлением 1500 – 2000 кПа, диаметр сопла 3 – 8 мм. Струя шлама перед истечением закручивается вокруг оси сопла с помощью сопловых завихрителей.

При использовании вращающихся дисков шлам поступает на диск через регулировочный клапан. Диск вращается со скоростью 2500 – 8000 мин<sup>-1</sup>. В бортовой стенке диска диаметром 200 – 250 мм установлено 8 сопел диаметром 13 – 15 мм. Шлам, проходящий через сопла, выталкивается из них центробежной силой с большой скоростью в виде струй из мельчайших капель.

Распыление шлама можно успешно применять только при хорошем измельчении сырьевой смеси для избежание засорения распыляющего устройства.

Форсунки и вращающиеся диски изготавливаются из легированных сталей вследствие абразивного действия шлама.

Особенностью теплообмена в таких сушилках является большая поверхность контакта сушильного агента и высушиваемого материала, что обеспечивает высокую интенсивность сушки. Время сушки составляет 2 – 5 с.

Топливо жидкое или газообразное. Температура теплоносителя на входе 600 - 1000°С, на выходе 110 - 120°С, удельный влагосъем – 5 – 10 кг/м<sup>3</sup>·ч, расход теплоты на сушку – 3100 - 3300 кДж/кг испаренной влаги, производительность – 400 – 600 кг/ч по сухому порошку. Движение теплоносителя и материала может быть прямоточное, противоточное, смешанное.

Преимущество РС:

- высокая интенсивность сушки;
- возможность получения мелкогранулированного продукта;

Недостатки РС:

- большие габариты;
- повышенный расход электроэнергии на аспирацию. Из сушки может уноситься до 50% всего материала.

#### Сушилки с кипящим слоем.

Сушилки с КС предназначены для сушки мелкодробленых материалов с приблизительно одинаковым размером частиц (песка, гранулированного шлака, угля, гравия, щебня). В промышленности стройматериалов начинают получать широкое распространение.

В сушилках с КС частицы материала высушиваются на решетке в псевдооживленном состоянии в потоке теплоносителя. Частицы при этом перемещаются и перемешиваются по толщине слоя. При скорости движения теплоносителя, приводящий к подъему частиц на высоту, значительно большую толщины слоя материала, образуется псевдофонтан материала. Сушилки с таким режимом работы называются «аэрофонтанными», а решетка у них отсутствует.

При сушке материалов, склонных к агрегированию, кипение слоя осуществляется за счет принудительной вибрации. Такие сушилки называют сушилками виброкипящего слоя.

Используются одна-, двух-, и трехкамерные сушилки периодического и непрерывного действия. Все они работают по принципу противотока.

#### Схема однокамерной сушилки с кипящем слоем непрерывного действия

Начальная температура теплоносителя может достигать 1000°C, температура решетки при этом – до 700°C. Температура отходящих газов 80 - 120°C, материала – до 100°C. Высота кипящего слоя – 0,7 - 0,75 м. Расход теплоты – 3400 – 6000 кДж/кг испаренной влаги. Объемное напряжение по влаге – 15 – 250 кг/м<sup>3</sup>·ч, время сушки – до 10 мин, живое сечение решетки – 1,5 - 3%.

Преимущества сушилки:

- высокая интенсивность сушки;
- простота, компактность;
- возможность одновременной классификации материалов;
- высокая производительность;
- возможность регулирования времени пребывания материала в сушилке.

Недостатки:

- повышенный расход электроэнергии для создания кипящего слоя;
- повышенный удельный расход теплоты;
- неравномерность сушки.

#### Сушильно – размольные установки.

(Мельницы совмещенного помола и сушки)

К ним относятся шаровые, молотковые, валковые, сепараторные мельницы, мельницы самоизмельчения «Аэрофол».

#### Шаровая сепараторная мельница.

Установки совмещенного помола и сушки используются в производстве вяжущих материалов в основном при получении гипсового вяжущего для его дегидратации. Температура теплоносителя составляет 400 – 700 °С в зависимости от скорости прохождения материала по длине мельницы. Движение газов обеспечивается за счет тяги, создаваемой дымососом. При движении газы увлекают частицы термообработанного гипса. Крупная фракция оседает в сепараторе и



возвращается на домол. Готовый продукт с необходимым размером фракции выносится потоком теплоносителя из сепаратора и отделяется в циклонах.

В результате аспирации мельницы за счет движение теплоносителя пылевидные частицы удаляются из ее корпуса. Это приводит к увеличению производительности мельницы и уменьшению расхода энергии, т.к. пыль уже не покрывает не измельченные куски материала, не налипает на мелющие тела и не ослабляет силу их удара. Скорость дымовых газов составляет 0,5 – 0,7 м/с, расход – 5000 – 6000 м<sup>3</sup>/ч. При таких условиях из зоны помола удаляются частицы размером 0 – 20 мкм. Тонина помола регулируется изменением расхода (или скорости) пылегазового потока посредством открытия или закрытия шиберов перед вентилятором, также поворотом лопаток сепаратора.

Барабанные мельницы выложенные изнутри броневыми плитами волнообразной формы, выполненными из марганцовистой стали. Между корпусом и плитами проложен слой листового асбеста для тепловой и звуковой изоляции.

Достоинства таких установок – упрощение технологического процесса.

Недостаток: неравномерность обжига в результате большой разницы в размерах частиц. Поэтому гипсовые вяжущие, получаемые в мельницах совместного помола и дегидратации, отличается повышенным содержанием растворимого ангидрита. Наряду с высокой тониной помола это обуславливает большую водопотребность и быстрые сроки схватывание.

#### Камерная сушилка

В корпусе камерной сушилки расположены полки, на которых находится высушиваемый материал. Это установка периодического действия. Ниже уровня пола камера имеет три канала – два боковых для подачи сушильного агента и один средний для его отвода. Камеры соединяются в блоки по 20 – 30 штук. Сушильный агент через боковые каналы попадает в камеру и, т.к. он легче воздуха в рабочем объеме камеры, поднимается вверх до тех пор, пока его масса в процессе охлаждения не выравнивается с массой воздуха камеры. По пути движения нагретый сушильный агент отдаёт теплоту холодному материалу и начинает движение вниз, а затем через средний канал выбрасывается в атмосферу. Смещение восходящих и нисходящих потоков сушильного агента вызывает многократную циркуляцию и достаточно равномерную сушку изделий. Время сушки составляет 2 - 3 суток. Расход теплоты 4200 – 6300 кДж/кг исп. влаги. В результате низкой интенсивности сушки такие установки вытесняются другими конструкциями.

#### Туннельные сушилки

- 1- корпус
- 2- вытяжной канал
- 3- приточный канал

Это установки непрерывного действия. Бывают прямоточными и противоточными. В промышленности вяжущих материалов используются для сушки гипсокартонных листов. Полочные вагонетки с изделиями передвигаются по рельсам с помощью толкателя. Туннельные сушилки также объединяются в блоки с одним фронтом загрузки и выгрузки. Длина одного туннеля составляет 24 – 38 м, ширина и высота 1,5 – 2 м. Сушильным агентом могут быть дымовые газы или нагретый в калорифере воздух.

Т.к. при сушке гипсовых изделий не допускается контакт горячего теплоносителя с изделиями в высушенном состоянии в виду опасности дегидратации, а также контакт сухих изделий с наиболее влажным отработанным сушильным агентом, то обычно используется прямоточно-противоточная схема. Подвод теплоносителя осуществляется на отметке 2/3 длины туннеля от загрузки изделий. При выходе поток разделяется на два. Один движется в одном направлении с изделиями в сторону выгрузки, второй – противотоком в сторону загрузки. Температура сушильного агента на входе 180-200 °С, на выходе 200 – 120 °С.

Достоинство: простота в эксплуатации

Недостаток: низкая эффективность сушки.

Время сушки 10 – 18 ч. Расход теплоты 4200 – 5000 кДж/кг исп.

#### Техника безопасности при эксплуатации сушилок

Сушильные установки должны, как правило, работать под разрежением. При загрузке и выгрузке материала особое внимание нужно обращать на то, чтобы продукты горения не попадали в цех. Сушильные цехи должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией. Все источники теплоты (корпуса, топки, газопроводы) должны быть обеспечены устройствами и приспособлениями, резко ограничивающими выделение конвекционной и лучистой теплоты в рабочем помещении. Температура нагретых поверхностей оборудования не должна превышать в местах нахождения обслуживающего персонала 45 °С. При большей температуре поверхность оборудования должна изолироваться. Все механизмы привода должны иметь ограждения.

Пуск сушильных установок запрещён при:

- 1) неочищенных или неисправных пылеулавливающих устройствах
- 2) сильных вибрациях и толчках элементов привода
- 3) недостаточном уплотнении газового тракта
- 4) падения давления газа у горелок и при утечке газа из газопровода.

При любой остановке дымососов дутьевой вентилятор немедленно должен быть остановлен. Запрещается открывать дверцу топки во время работы дутьевого вентилятора.

#### **Тепловые установки для дегидратации гипсового камня**

Для дегидратации гипсового камня используются следующие тепловые установки:

- 1) Гипсоварочные котлы;
- 2) Запарники, самозапарники;
- 3) Сушильные барабаны;

- 4) Сушильно–размольные установки (пневматические сушилки, барабанные мельницы);
- 5) Вращающиеся барабаны.

#### Гипсоварочные котлы

Используются для получения полуводного  $\beta$ -гипса (строительного). По габаритам и производительности котлы делятся на малогабаритные (рабочий объем 2–2,5 м<sup>3</sup>) и крупногабаритные (рабочий объем до 12 м<sup>3</sup> и более). По режиму работы котлы делятся на аппараты периодического и непрерывного действия. В настоящее время наибольшее распространение имеют ГВК периодического действия, работающие с нестационарным по времени тепловым режимом.

#### Схема гипсоварочного котла периодического действия с объемом 12 м<sup>3</sup>

ГВК ПД состоит из сварного цилиндрического корпуса с толщиной стенок 12–16 мм с разъемным выгнутым кверху сферическим днищем, омываемым снаружи горячим дымовыми газами. Днище выполнено из жаростойкой стали толщиной 35 мм.

Для увеличения поверхности нагрева в корпусе котла установлены четыре горизонтальные жаровые трубы диаметром 400 мм. В котлах малой емкости труб нет. Котел обмурован снаружи кирпичной кладкой, которая образует камеру, являющуюся продолжением топки.

Для перемешивания гипса котел снабжен мешалкой, состоящей из вертикального вала с надетыми на него траверсами с лопастями. На нижнюю траверсу навешивают цепи для очистки днища и предупреждения привара гипса.

Сферическая форма днища обеспечивают увеличение поверхности нагрева.

В крышке котла имеется патрубок для отвода водяных паров и люки для загрузки гипсовой муки. Загрузка порошка сырого гипсового камня должна быть постепенной при работающей мешалке для избежания ее поломки, так как свежезагруженный материал приобретает подвижность не сразу и может тормозить вращение мешалки.

Сырая гипсовая мука должна иметь размеры 120–150 мм. Температура материала в котле в процессе варки поддерживается на уровне 140–155<sup>0</sup>С. Во время варки происходит кипение материала в результате выделения водяных паров. Об окончании варки судят по прекращению кипения.

Продолжительность варки составляет 1–2,5 часа.

Удельная производительность (удельный съем гипса) варочных котлов –600–1000 кг/(м<sup>3</sup>·ч), часовая производительность –7 т/ч. Удельный расход теплоты – около 1700 кДж/кг готового продукта. Расход условного топлива –5–7 % от массы готового продукта. Температура газов на входе–900–1000<sup>0</sup>С, отходящих газов–400–500<sup>0</sup>С. Использованные дымовые газы обычно подвергают утилизации – для подсушки и подогрева сырья.

Продолжительность варки и расход топлива зависят от следующих факторов:

- 1) от размеров котла;
- 2) от природы сырья;
- 3) от наличия примесей;
- 4) от тонины помола;

- 5) от температуры загружаемого сырья;
- 6) от степени частичной дегидратации гипсовой муки при утилизации отработанного сушильного агента

Важной характеристикой ГВК является отношение активной площади теплопередачи (сферическое днище, жаровые трубы, стенки) к его полезному объему. Обычно составляет 3:1. Полезный объем –  $\frac{3}{4}$  реального объема.

#### Преимущества ГВК ПД:

- 1) простота конструкции;
- 2) чистота и однородность получаемого продукта.

#### Недостатки:

- 1) периодичность работы;
- 2) Затруднения в автоматизации управления процессом;
- 3) низкая эффективность передачи тепла через стенку котла, что влечет низкий тепловой КПД – 19–20%.

Реальный КПД еще ниже (до 15%) из-за промежуточных потерь теплоты при загрузке и выгрузке.

### Гипсоварочный котел непрерывного действия

#### Схема гипсоварочного котла непрерывного действия с производительностью 5–6 т/ч

ГВК НД состоит из корпуса и сферического днища, внутри имеется вертикальный винтовой конвейер, помещенный в жаровую рубашку, которая подвешивается внутри котла на металлической раме. Конвейер предназначен для непрерывного удаления готового продукта из котла. Порошок гипсового камня загружают из бункера в периферическую часть котла шнеком– дозатором через загрузочное устройство, Материал в котле перемешивается и одновременно циркулирует. Сваренный гипс, имеющий меньшую плотность по сравнению с плотностью сырой муки, перемещается вверх и с помощью конвейера выгружается из котла. Процесс варки автоматизирован, за контрольную температуру принимают температуру выходящего материала.

Объем гипсоварочного котла,  $V$ , м<sup>3</sup>:

$$V = \frac{G \cdot \tau_{ц}}{\gamma \cdot a} + z \cdot 0.785 \cdot d^2 \cdot D,$$

где  $G$ – часовая производительность котла, т/ч;

$\tau_{ц}$ – полная производительность цикла варки котла, ч; (0,7–3ч)

$\gamma$ – насыпная плотность гипсовой муки (0,8–1,2 т/м<sup>3</sup>);

$a$ – коэффициент, учитывающий объем перемешивающего устройства и недосыпку муки по высоте котла, (=0,9);

$z$ – число жаровых труб в котле ;

$d$ – наружный диаметр жаровых труб, м;

$D$ – внутренний диаметр жаровых труб, м.

$$\frac{H}{D} = 1 \div 0.5,$$

где  $H$ – средняя внутренняя высота котла, м.

Удельный сьем продукции 1 м<sup>3</sup> объема котла:

$$g_v = \frac{G}{V}, \quad m/(m^3 \cdot ч)$$

$$D = 1,1 \div 1,45 \sqrt[3]{V}$$

### **Запарочные аппараты**

ЗА–аппараты периодического действия, предназначены для тепловой обработки (дегидратации) гипсового щебня фракции 25–50 мм паром под давлением 0,15 МПа и получения высокопрочного  $\alpha$ –гипса. Разделяются на аппараты, в которых используется пар от котельной (запарники) и, в которых используется пар, выделившийся в процессе дегидратации.

Запарники отличаются между собой устройством подвода пара.

#### Схема запарника

Запарник представляет собой вертикально установленный цилиндр с толщиной стенок 8–10 мм, диаметром 2–3 м, высотой 4–5 м. Люки для загрузки и разгрузки выполнены герметичными для создания в аппарате избыточного давления пара. Пар подается в запарник через внутреннюю перфорированную трубу, а конденсат отводится через дырчатую внутреннюю стенку и кольцевой коллектор пара по трубе.

После загрузки в аппарат гипсовый щебень вначале подогревают в течение 20–30 мин до 60–70<sup>0</sup>С горячими газами для экономии пара и снижения выхода конденсата. Затем задраивают люки и подают насыщенный пар. Щебенка пропаривается в течение 5–7 ч при температуре 125<sup>0</sup>С. Через каждые 15 мин из аппарата выпускается конденсат. После отключения подачи пара материал вновь подогревают горячими газами в течение 4–5 ч до температуры 160–165<sup>0</sup>С. При этом он высушивается и выгружается. Общая продолжительность термообработки гипсового щебня в запарниках 10–15ч.

### **Самозапарники**

Самозапарники имеют такую же конфигурацию корпуса, как и запарники, но размеры их меньше.

Варка гипсового щебня осуществляется топочными газами, которые пропускают через кольцевой пучок труб, расположенных вдоль стенки корпуса. Через них пропускаются дымовые газы с температурой 500–600<sup>0</sup>С.

#### Схема самозапарника

Схема и последовательность операций по варке гипса здесь аналогична рассматриваемому аппарату.

Разновидностью самозапарника является вращающийся барабан объемом около 10 м<sup>3</sup> с внутренним пучком труб. Снаружи барабана имеются три бандаж, через которые он опирается на роликоопоры.

#### Схема вращающегося барабана

Барабан приводится во вращение со скоростью 0,5–0,7 об/мин от электродвигателя через редуктор, выходной вал которого соединен с одним из

опорных роликов. Загрузка и разгрузка материала осуществляется периодически через герметичные люки по периферии барабана. Топочные газы пропускаются через пучок труб, происходит дегидратация щебня, образующийся пар отводится через специальные трубопроводы, а конденсат – через штуцеры.

Преимуществом ВБ является то, что материал здесь непрерывно перемешивается, что сокращает продолжительность цикла варки гипса. Самозапаривание длится 1,5 ч при 0,13 МПа, сушка – 1ч. Продолжительность всего цикла – 3 ч. Другое преимущество ВБ – возможность варки мелкоизмельченного гипсового камня (отсева, отходов и т.д.) и отсутствие необходимости фракционирования. Для сокращения потерь теплоты во внешнюю среду и предотвращение излишней конденсации корпус запарочных аппаратов целесообразно снаружи изолировать.

## **Тепловые установки для тепловлажностной обработки.**

### Автоклавы

Автоклавы предназначены для тепловлажностной обработки материалов и изделий насыщенным водяным паром, получаемым из котельных под избыточным давлением 0,8-1,2 МПа и температуре 174-207°С. Это аппараты периодического действия со съемными торцевыми крышками, снабженными безболтовыми быстродействующими байонетными затворами. Автоклавы бывают проходные, если обе крышки съемные, и тупиковые, если одна крышка съемная, а другая – глухая. Материалы и изделия загружают в проходные автоклавы с одного конца, а выгружают с другого; в тупиковых загружают и выгружают с одного конца, на котором установлена съемная крышка.

Автоклавы изготовлены в виде горизонтального металлического сварного барабана со стандартными размерами: диаметр – 2; 2,6 и 3,6 м, длина – соответственно 17; 19,1 и 21 м.

Для открывания и закрывания съемных крышек предназначены подъемный и поворотный механизмы, консольно подвешенные на рычагах. Крышки запираются герметично с помощью байонетного кольца, поворачивающегося вокруг оси автоклава.

Такое кольцо снабжено выступами, равномерно расположенными по окружности. На крышках автоклава выступы расположены по окружности так, что когда автоклав закрыт, выступы крышки находятся за выступами байонетного

кольца. Получается прочный замок по всей окружности. Между крышкой и байонетным кольцом в качестве уплотнения установлено резиновое кольцо.

Барaban установлен на опорах, одна из которых неподвижная, остальные – скользящие, для компенсации термического расширения корпуса.

Открывают крышку с отводом ее в сторону, а закрывают при помощи привода с электродвигателем, редуктором и открытой зубчатой передачей. Крышка передвигается по монорельсу на катках.

Для создания замка байонетное кольцо гидравлическим приводом поворачивается на расстояние, равное половине шага между выступами. После того, как крышка установлена и сцепление ее с кольцом произошло, через штуцер пускают пар, давлением которого резиновое уплотнение плотно прижимается к линии разъема крышки. Так исключается прорыв пара через зазоры между крышкой и корпусом автоклава. Управление механизмами открывания и закрывания крышек автоматизировано.

Внутри автоклава уложен рельсовый путь нормальной колеи, по которому закатывают и выкатывают вагонетки с материалами или изделиями. На корпусе автоклава предусмотрены фланцы для подключения паропровода, конденсатоотвода, установки приборов и арматуры. Внешняя поверхность барабана, крышек и паропроводов покрывается теплоизоляцией.

Силикатобетонные сырцовые изделия загружают в автоклав после того, как они в сформованном виде достигли определенной прочности, не допускающей их разрушения. Для каждого вида изделия устанавливается режим тепловлажностной обработки, исключающий нарушение его структуры и снижение прочности.

Цикл работы автоклава складывается из следующего времени: загрузки материала, тепловой обработки, включающей время подъема температуры, изотермической выдержки, спуска пара, охлаждения материала, его выгрузки и очистки автоклава. Цикл работы составляет от 7 до 18 часов в зависимости от обрабатываемого материала и необходимых свойств готовых изделий.

На первой стадии автоклав продувают паром для удаления из него воздуха, т.к. его теплопроводность значительно ниже, чем у пара, что вызывает дополнительный его расход. При прогреве аппарата образуется много конденсата и для предотвращения размыва им изделий применяют экран из отдельных листов, отводящий конденсат в нижнюю часть автоклава, в сосуд-отстойник, установленный рядом с автоклавом. Эта стадия происходит под высоким давлением и температурой. Продолжительность первой стадии 1-3 часа.

На второй стадии происходит изотермическая и изобарная выдержка, когда температура и давление пара постоянны. Ее продолжительность 5-10 часов. Третья стадия – спуск пара, снижение давления до атмосферного, температуры – до 100°C и ниже. Ее продолжительность 1,5-2 часа. Наибольшая продолжительность каждой стадии процесса соответствует обработке силикатобетонных изделий большой толщины и наименьшим значением параметров пара. Средний расход пара в

процессе тепловлажностной обработки составляет 100-150 кг на 1 м<sup>3</sup> изделий за 1 час, что соответствует расходу за весь цикл 600-2000 кг пара на 1 м<sup>3</sup> изделий.

В автоклавах обрабатываются следующие материалы: силикатный кирпич, ячеистый бетон, тяжелый бетон, асбестоцементные изделия, высокопрочный гипс.

Способ автоклавирования для получения высокопрочного  $\alpha$ -гипса в нашей стране не используется, хотя в зарубежной практике этот способ распространен. В автоклав загружают гипсовый щебень 15-50 мм в вагонетках и обрабатывают под давлением 0,15 МПа и температуре около 135°C. Дальнейшее повышение давления нецелесообразно, т.к. это негативно сказывается на структуре кристаллов готового изделия. Автоклавная обработка асбестоцементных изделий позволяет экономить цемент, т.к. эти изделия в данном случае могут изготавливаться на основе цемента с добавками песка.

### Техника безопасности при работе с автоклавами

При работе с автоклавом должны соблюдаться следующие правила. После загрузки автоклава запарочными вагонетками включается гидропривод и механизм подъема крышек. После полного закрытия крышки специальное устройство – конечный выключатель дает разрешение на поворот байонетного кольца. В конце поворота кольца срабатывает конечный выключатель, заблокированный с программным регулятором запарки (ПРЗ). В соответствии с предусмотренной программой происходит весь процесс запарки, по окончании которого автоматически выпускается пар и конденсат. Система блокировки такова, что крышка открывается только при отсутствии внутри автоклава избыточного давления, а также конденсата. При сбросе давления срабатывает точный электрический манометр, дающий первое разрешение на поворот байонетного кольца. Второе разрешение поступает от сигнализатора уровня конденсата и третье – при ручном открытии контрольного крана. Последнее разрешение дает конечный выключатель, срабатывающий при условии, если крышка автоклава полностью закрыта.

Т.к. автоклавы – сосуды, работающие под избыточным давлением более 70 кПа, они подконтрольны Ростехнадзору и подлежат регистрации в его органах. Аварийноопасными являются байонетные затворы, представляющие собой тяжелые съемные устройства. Применяются специальные устройства безопасности открытия и закрытия байонетных затворов. Средства автоматики позволяют открывать крышку автоклава только при полном сбросе избыточного давления пара, а подавать пар в автоклав – лишь при нормальном зацеплении байонетного затвора.

Не менее одного раза в шесть лет производятся гидравлические испытания на давление, превышающее рабочее на 25%. Каждый автоклав снабжается двумя предохранительными клапанами и манометрами, на циферблатах которых выделено красной краской предельное рабочее давление. После каждого цикла работы крышки автоклава должны подвергаться осмотру. При наличии какого-либо повреждения работа автоклава должна быть прекращена.

### Перепуск пара

Для экономии пара на запаривание изделий пар после завершения процесса обработки в одном автоклаве перепускается в другой с вновь загруженными



изделиями или в аккумулятор пара. Это позволяет экономить до 10-15% пара. При включении системы вакуумирования, которая создает в автоклаве перед пуском вакуум, количество использованного отработанного пара за счет перепуска повышается до 15-18%.

Перепуск пара может осуществляться из автоклава в автоклав при наличии их в количестве не менее 5 штук, или в паровой аккумулятор пара при наличии 2-4 штук. В качестве парового аккумулятора используют старый автоклав малого диаметра.

### График ступенчатого перепуска пара

### Конструктивный расчет автоклава

При расчете автоклавов на прочность определяют необходимую толщину стенок цилиндрической части корпуса и крышек по заданному давлению пара, или допустимое рабочее давление пара по заданной толщине стенок. Толщина стенок барабана определяется по формуле, мм:

$$S = \frac{pD}{2\varphi\delta - p} + C,$$

где  $D$  – внутренний диаметр барабана в мм;

$C$  – прибавка (запас) на толщину стенки в мм, принимается  $\approx 1$  мм;

$p$  – расчетное избыточное давление пара в кПа, равное максимальному давлению пара в котельной с прибавкой 5%, учитывающей настройку предохранительного устройства автоклава;

$\varphi$  – коэффициент прочности, учитывающий ослабление кольцевого сечения стенки технологическими отверстиями,

$$\varphi = \sum d / (\pi \cdot D),$$

где  $\sum d$  – сумма диаметров отверстий, входящих в ослабленное кольцевое сечение барабана;

$\delta$  – допускаемое напряжение стального листа,  $112 \cdot 10^3$ - $150 \cdot 10^3$  кПа, зависит от марки стали.

Толщина торцевой крышки барабана, мм:

$$S_k = 0,31D \sqrt{\frac{p}{\delta}}$$

### Пропарочные камеры

ПК для тепловлажностной обработки изделий из цементных бетонов работают под небольшим избыточным давлением насыщенного пара при

температуре около 100°C. Пропариваемые изделия занимают около 10-15% рабочего объема камеры. Расход пара за весь цикл пропарки составляет 200-400 кг на 1 м<sup>3</sup> изделий.

Распространены горизонтальные (туннельные) пропарочные камеры периодического действия с подачей пара по кольцевым перфорированным трубам. Изделие загружаются в камеры на вагонетках через двери торцовых стенок. При подаче пара в камеры он вытесняет воздух, после чего во всем объеме камеры поддерживается одинаковая температура. Для поддержания постоянной температуры в камерах они снабжаются гидравлическими клапанами или водяными затворами, через которые проходит избыток пара при некотором избыточном давлении.

### Теплоотдача при конденсации

В установках тепловлажностной обработки, где происходит пропаривание или запаривание, нагревание изделий происходит за счет теплоотдачи при конденсации водяных паров. Различают капельную и пленочную конденсацию. В автоклавах и ПК теплоотдача происходит в условиях пленочной конденсации, когда конденсат смачивает поверхность и образует сплошную пленку.

Коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации вычисляется по формуле:

$$\alpha_{\text{кон}} = c^4 \sqrt{\frac{\lambda_{\text{ж}}^3 \cdot \rho_{\text{ж}}^2 \cdot r \cdot g}{\mu_{\text{ж}} \cdot l \cdot \Delta t}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

где  $r$  – скрытая теплота парообразования;

$g$  – ускорение свободного падения;

$\lambda$  – теплопроводность;

$\rho$  – плотность;

$\mu$  – динамическая вязкость;

$l = H$  (высоте);

$c = 2,04$  при конденсации пара на вертикальной поверхности,  $c = 1,28$  при конденсации пара на горизонтальной поверхности.

$\alpha$  при пленочной конденсации изменяется в пределах  $(7..12) \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При наличии в паре воздуха величина  $\alpha$  для конденсирующегося пара резко снижается.

### Пропарочные камеры

Тепловлажностная обработка цементных бетонов является наиболее длительным и ответственным процессом в технологии их производства. Сущность ее заключается в повышении температуры среды до 80-100<sup>0</sup>С. При этой температуре скорость реакций гидратации значительно увеличивается, процесс набора прочности ускоряется, а изделия в более короткий срок приобретают механическую прочность, допускающую их транспортировку и монтаж. Пропарочные камеры работают под атмосферным либо небольшим избыточным давлением. Пропариваемые изделия занимают 10-15% рабочего объема камер. Бетонные и железобетонные изделия весьма разнообразны по своим геометрическим размерам, форме и другим свойствам, что и обуславливает

применение разнообразных пропарочных камер. В качестве теплоносителя используется пар, паровоздушная смесь, подогретый и увлажненный воздух, электроэнергия, обработанные дымовые газы. Нагрев изделий теплоносителем, происходит при непосредственном соприкосновении с ним открытых поверхностей, либо через стенки формы. В случае использования электроэнергии нагрев осуществляется либо при непосредственном прохождении электрического тока через бетон, либо косвенным способом при помощи излучателей.

### Ямные пропарочные камеры

Ямные камеры имеют прямоугольную форму, иногда со скругленными углами для улучшения циркуляции теплоносителя. Высота обычно до 4м, ширина 1,5-4м, длина 7-13м. Как правило, ямные камеры заглублены в землю на 1-2м. Кол камеры бетонный со слоем теплоизоляции, имеет уклон 0,005-0,01 для стока конденсата. Стены железобетонные с отверстиями для подключения паропровода и сообщения с атмосферой. Сверху камера закрывается съемной крышкой, заполненной теплоизоляцией. Нижняя поверхность крышки обшита стальным листом. Крышка также сделана с уклоном 0,005-0,01, чтобы капли конденсата с нее не попадали на поверхность изделия. Уплотнение между крышкой и камерой выполнено в виде гидравлического или песочного затвора, представляющего собой желоб по периметру стен, заполненный песком или водой. В желоб погружены края крышки.

Принцип работы ямной камеры. После загрузки камеры изделия крышку закрывают и начинают впуск пара. Т.к. весь свободный объем до этого был заполнен воздухом, в первый период тепловлажностной обработки сказывается вредное влияние воздуха – понижается коэффициент теплоотдачи и скорость подъема температуры. Температура поднимается до 100<sup>0</sup>С в тот момент, когда воздух будет полностью вытеснен из камеры, и она заполнится насыщенным водяным паром. Период подогрева завершается, когда поверхность изделий нагреется до температуры теплоносителя. Во втором периоде количество подаваемого пара меньше чем в первом за счет снижения количества конденсата. По окончании периода изотермической выдержки подача пара прекращается, камера вентилируется, изделия остывают, а затем выгружаются. Из-за периодичности работы теряется 20-25% теплоты, идущей на нагрев самой камеры. 10-12% теряется из-за утечки пара через неплотности. Расход пара составляет 200-300кг/м<sup>3</sup> бетона.

### Туннельные камеры

Туннельные камеры, как и ямные, являются безнапорными. Кроме того, они могут быть периодического и непрерывного действия. В отличии от ямных они расположены на уровне земли.

Туннельные камеры периодического действия устанавливаются по несколько штук блоком с общими стенками и одним фронтом обслуживания. В них обрабатываются изделия небольшого размера и правильной формы, уложенные штабелями на вагонетках. Стены камеры обычно железобетонные. Перекрытие сверху имеют уклон к одной из продольных стен для стекания конденсата. Внутренние поверхности стен и перекрытия покрыты слоем гидроизоляции. Подвод пара в камеру осуществляется через перфорированные трубы, уложенные по всей

длине по бокам или по центру камеры. На носу камеры устраивают 1 или 2 рельсовых пути. Длина камеры составляет обычно 10-25м и определяется равномерностью выхода пара по длине перфорированного паропровода. Высота камеры не превышает 2м. Недостатком таких камер является слабая герметизация дверей.

Туннельные камеры непрерывного действия выполняются одно и многоярусными, обычно трех и четырех ярусными. Длина туннеля составляет 70-130м. Перед многоярусными камерами и после них устанавливаются подъемники для подачи вагонеток на верхние ярусы и снижатели для спуска вагонеток на уровень пола. Изделия при движении по туннелю проходят последовательно зону подогрева, изотермической выдержки и охлаждения. Для избежания утечки теплоносителя торцовые стенки камеры снабжаются гибкими шторами. Недостатком многоярусных камер является расслаивание газовых потоков по высоте, т.к. между ярусами нет перекрытий, а также потери теплоты через торцы камер. Температура в верхней камере всегда выше, чем в нижней, а влажность паровоздушной смеси ниже.

#### Щелевые камеры

Это установки непрерывного действия. Обычно состоят из одного туннеля, имеющего в поперечном сечении форму щели для перемещения формы вагонетки с одним рядом изделий. Для экономии производственной площади камеры располагают ниже уровня пола цеха под формовочным конвейером, таким образом, чтобы они совместно с последним образовали двухъярусным конвейер. В щелевых камерах отсутствует расслаивание тепловых потоков по высоте, поэтому они отличаются высокой тепловой эффективностью. Расход пара на 1м<sup>3</sup> бетона в щелевой камере составляет 200-250кг.

В последние годы стали применять щелевые камеры с электроподогревом, в которых на полу камеры под вагонетками расположены трубчатые электрические нагреватели (ТЭНы), объединенные по несколько штук в блоки. ТЭНы представляют собой тонкостенные стальные или латунные трубки длиной до 3м. Внутри трубки вмонтирована спираль сопротивления из нихромовой проволоки, нагреваемой электротоком. Пространство трубки заполнено огнеупорной электроизоляционной массой, при соприкосновении с которой поверхность трубки нагревается и передает изделиям теплоту излучением. Температура на поверхности ТЭНов составляет 400-800<sup>0</sup>С. Применение электронагрева позволяет сократить время тепловлажностной обработки, увеличить уровень автоматизации и исключить наличие на предприятии паросилового цеха.

#### Кассетные установки

Получили широкое распространение в технологии крупноразмерных бетонных изделий небольшой толщины. Представляет собой пакет, состоящий из 2-14 вертикальных форм, в которых происходит формование изделий. Формы с обеих сторон имеют паровые рубашки для подачи в них пара. Давление в рубашках составляет 0,02 МПа. Теплообмен в кассетах происходит контактным способом. При соприкосновении изделий с нагретыми стенками формы теплота от них

распространяется теплопроводностью вглубь изделия. Изделия равномерно прогреваются по всей поверхности до максимальной температуры за 1,5-2ч.

### Подогрев бетонной смеси

Предварительный подогрев бетонной смеси является одним из наиболее экономичных и эффективных способов сокращения производственного цикла. Форсированные режимы автоклавной обработки изделий, изготовленных из холодной смеси приводят к ухудшению физико-химических свойств бетона из-за нарушения ее структуры. Использование предварительно разогретой бетонной смеси повышает также экзотермических реакций при твердении. Установлено, что при использовании холодных смесей максимальное количество теплоты выделяется в конце обработки, в отличие от использования горячих смесей. Существует 2 способа подогрева бетонной смеси: электроэнергией и острым паром. С помощью электропрогрева бетонную смесь можно разогреть за несколько минут до 50-70<sup>0</sup>С.

За счет предварительного разогрева можно снизить время ТВО на 1-1,5ч, или снизить температуру ТВО на 15-20<sup>0</sup>С.

### **Шахтные печи для производства вяжущих материалов**

Шахтные печи делятся на 3 основные группы:

- 1) Пересыпные, в которых твердое топливо сгорает в среде материала;
- 2) Работающие на газе или мазуте;
- 3) Снабженные топками полного сгорания, или полугодовальными, используются в основном в основном при низкотемпературном обжиге.

ШП являются печами непрерывного действия. Она представляет собой вертикальную шахту с круглым, эллипсоидным или прямоугольным сечением высотой от 9 до 27м с наружным диаметром 3,8 – 5,6м и внутренним 2,5 – 4,3м. Рабочий объем составляет 45 – 750м<sup>3</sup>. Шахта оборудована механизмами для загрузки и выгрузки материала, вентиляторами для подачи холодного воздуха и отбора отходящих газов и устройствами для сжигания топлива. В рабочей печи все шахты заполнены кусковым материалом, который, двигаясь сверху вниз под действием силы тяжести, последовательно подогревается, обжигается и охлаждается. Готовый продукт выгружается в нижней части шахты через разгрузочное устройство при этом весь столб материала опускается вниз и на освободившееся место поступает сырой материал. Печь работает по принципу противотока: в зоне подогрева и обжига материала навстречу дымовым газам, а в зоне охлаждения – на встречу воздуху. Воздух охлаждает материал, при этом сам нагревается и горячим достигает зоны обжига, где участвует в процессе горения или смешивается с топочными газами, если топливо сгорает в топке. Шахта выполнена из кирпича и помещена в металлический кожух, под шахтой находится опора, роль которой выполняет железобетонная плита. Стена печи является многослойной: внутренний слой выполнен из огнеупорного кирпича толщиной 210 – 230мм в зоне подогрева и охлаждения и 350 – 460мм в зоне обжига. Следующий слой – теплоизоляционный, из шамота, толщиной 210 – 230мм, пространство между изоляционным слоем и металлическим кожухом 50 – 60мм. Все материалы, обжигаемые в шахтных печах, в зависимости от режима обжига можно разбить на две группы: материалы низко- и высокотемпературного обжига. К первой группе

относятся гипс, низкообжиговый шамот; второй известь, низкообжиговый шамот, цементный клинкер и т. д. (1200 – 1500°С).

Печи низкотемпературного обжига топками полного сжигания топлива, вынесенными за пределы шахты. В них используется любой вид топлива. Топочные газы на входе в шахту разбавляются воздухом для образования газовой смеси требуемой температуры.

В печах высокотемпературного обжига топливо сгорает в самой шахте среди обжигаемого материала. Если топливо твердое, его подают в печь через загрузочное устройство в смеси с материалом или послойно. Такие печи называются пересыпными. В пересыпных печах используют только короткопламенное топливо, преимущественно антрацит (для избегания потери летучих горючих веществ в зоне подогрева).

Длиннопламенное топливо сжигается в полугазовых топках, пристроенных к шахте на уровне зоны обжига. Образовавшийся в них генераторный газ имеет высокую температуру и при смешивании в шихте с нагретым воздухом, сгорает среди кусков материала с выделением большого количества теплоты.

Газообразное топливо сжигают в горелках, вмонтированных в стенки шахты в зоне обжига. В печах, работающих на мазуте, шахта в поясе зоны имеет специальные форномеры, предназначенные для предварительной газификации мазута. Продукты газификации содержат 20 – 25% горючих газов и имеют высокую температуру. Полное сжигание осуществляется среди кусков материала с большим тепловым эффектом.

#### Шахтные печи для обжига известняка

В шахтных печах обжигают плотные карбонатные породы – известняки, доломиты. Куски мела не обладают достаточной механической прочностью, поэтому они разрушаются и забивают шахту, что препятствует фильтрации через слой материала. Поэтому мел целесообразно обжигать во вращающихся печах. ШП для обжига известняка могут работать на любом виде топлива.

В печи проводится обжиг известняка с размером кусков 50 – 100мм. Шахта пересыпной шахтной печи с производительностью 200т\сут имеет цилиндрическую форму с внутренним диаметром 4,3м и рабочей высотой 25м. Толщина стального цилиндра кожуха – 10мм. Печь снабжена двухканальным загрузочным механизмом для послойной подачи материала топлива. Загрузочное устройство обеспечивает регулярную загрузку материала и топлива в печь, равномерное распределение их по шахте и герметичность для избегания подсоса наружного воздуха. Клапаны жестко насажены на шток таким образом, что при возвратно – поступательном движении штока происходит поочередное открытие и закрытие клапанов. Когда верхний клапан открыт, нижний закрыт, и наоборот. Благодаря этому шахта не сообщается с атмосферным воздухом.

Разгрузочный механизм служит для непрерывной выгрузки обожженного материала при абсолютной герметичности нижней части шахты. Состоит из платформы, на раме которой уложены колосники клинообразной формы. Стол материала опирается на поверхность колосников, платформа совершает возвратно – поступательные движения. При этом часть кусков материала проваливается между колосниками, а крупные куски скатываются в бункер.

Для обеспечения герметичности существует шлюзовое уплотнительное устройство, состоящее из двух – трех камер, последовательно расположенных за точкой бункера. Каждая камера отделена от предыдущей автоматически открывающимся затвором. Заслонки затвора открываются поочередно. При движении материала по камерам открыт только один затвор – по ходу движения, а другой затвор всегда закрыт. Этим достигается уплотнение нижней части шахты, препятствующее выходу в атмосферу вдуваемого воздуха. В случае использования в качестве топлива газа он подается в печь горелками через отверстия в стенах печи, а также по оси шахты через осевую горелку. Скорость продвижения материала зависит от ее объемной массы и скорости выгрузки его в нижней части шахты.

По высоте шахты условно делятся на три технологические зоны: подогрева, обжига, охлаждения. Высота зоны подогрева определяется влажностью и величиной кусков обжигаемого материала. Высота зоны охлаждения определяется температурой обжига. Воздух, пройдя снизу шахты зону охлаждения, охлаждает материал и нагревается до температуры 300 – 500°C. Далее он поступает в зону обжига, в которую опускается нагретый известняк. Здесь происходит сжигание газа и декарбонизация известняка. Продукты горения вместе с технологическим CO<sub>2</sub>, двигаясь вверх, поступают в зону подогрева, охлаждаются до 200 – 220°C и выбрасываются в атмосферу. Известь выгружается из печи с температурой 80 – 100°C.

#### Показатели работы шахтных печей

- 1) Удельная производительность, определяется двумя показателями:
  - А) Плоскостное напряжение  $R_F$ , т/м<sup>2</sup>·сут или (час)  
Для пересыпных печей  $R_F = 10 - 14$  т/м<sup>2</sup>·сут
  - Б) Объемное напряжение  $R_V$ , т/м<sup>3</sup>·сут или (час)  
 $R_V = 0,6 - 0,85$  т/м<sup>3</sup>·сут
- 2) Удельный расход топлива. Для пересыпных и газовых печей составляет 170 – 190 кг усл. топлива/т извести.
- 3) Тепловой КПД печи  $\eta$ ; для пересыпных и газовых печей составляет  $\eta = 70 - 75\%$ , с полугазовыми топками – 50 – 60%, для цементных печей – 45– 60%.  
К полезной теплоте относится теплота испарения влаги и теплота химических реакций.
- 4) Удельный расход топлива кДЖ/кг материала. Для известковых печей – 160 – 180 к у т/т

#### Достоинства шахтных печей

- 1) Малая материальная и удельная стоимость капиталовложений
- 2) Достаточно высокий тепловой КПД
- 3) Полная механизация операций
- 4) Низкие затраты тепловой энергии

#### Недостатки шахтных печей

- 1) Низкая производительность
- 2) Низкое качество извести и цементного клинкера
- 3) Повышенный расход электроэнергии тягодушевого оборудования

### Особенности теплообмена шахтных печей

Работа ШП основана на принципе конвективного теплообмена между плотным слоем материала, движущимся сверху вниз, и газами, фильтрующимися через слой материала снизу вверх. Печь характеризуется слоевым режимом внешнего теплообмена. Доля теплового излучения из – за заполнения материалом газового пространства и малой длины луча при высоких температурах не превышает 20%. Теплопроводность влияет на теплообмен только в крупных кусках (более 4мм). Теплообмен связан также с термическим сопротивлением каждого обжигаемого куска материала.

Коэффициент теплопередачи с учетом термического сопротивления определяется по формуле:

$$K_{\Gamma} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Gamma}} + \frac{d_{\text{ЭКВ}}^2}{72\lambda(1-\varphi)}}$$

где  $\alpha_{\Gamma}$  – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>3</sup>·К

$\frac{1}{\alpha_{\Gamma}}$  – термическое сопротивление на поверхности куска, величина обратная  $\alpha_{\Gamma}$

$\lambda$  – теплопроводность кусков материала, Вт/м·К

$d_{\text{ЭКВ}}$  – эквивалентный диаметр, м

$\varphi$  – пористость слоя материала, в долях

Коэффициент теплоотдачи для разнокусовой засыпки находят по экспериментальной формуле:

$$\alpha_{\Gamma} \approx 46 \left[ \frac{\omega^{0,9}(T_{\Gamma} \cdot T_{\text{м.с.}})^{0,15}}{d_{\text{с}}^{0,75}} \right], \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{К}$$

где  $\omega$  – условная скорость газов при °С, отнесенная ко всему (пустому) сечению шахты, м/с

$T_{\text{м.с.}}$  – средняя температура материала в слое, °К

$T_{\Gamma}$  – температура газов, °К

Процессы теплообмена и горения топлива в шахтной печи значительно ускорить, уменьшая размер кусков материала и увеличивая скорость газов. Однако этому препятствует рост гидравлического сопротивления.

### Шахтная печь для обжига цементного клинкера

ШП для получения ПЦК находят распространение за рубежом при получения цемента из пластичных природных мергелей. Перед обжигом в сырьевую смесь добавляется тонкоизмельченное твердое топливо, затем из нее изготавливают т.н. «черный брикет» или черные гранулы размером 15 – 25мм. Конструктивное отличие печи для получения клинкера обусловлено условием сгорания топлива, запрессованного в материал, высокой температуры обжига (1400 – 1500°С), особенностью физико-химических процессов, протекающих в обжигаемом материале, и спекшейся структурой готового продукта.

Для осуществления равномерного обжига по сечению шахты ее внутренний диаметр не должен превышать 2,8м. Верхняя часть шахты книзу постепенно сужена во избежания образования у ее стенок сквозных каналов, вызванных усадкой материала при спекании. Т.к. слой спекшегося клинкера имеет большое



сопротивление, в печи создают высокое давление воздушного дутья, достигающего 15 – 25кПА. Разгрузочное устройство выполнено в виде вращающейся зубчатой решетки для дробления спекшегося клинкера конгломерата.

Для успешного сжигания топлива, запрессованного в материал, требуется проникновение кислорода внутрь гранул и повышенная его концентрация в окружающей среде, т.к. образование при горении  $\text{CO}_2$  может восстановиться до  $\text{CO}$  при соприкосновении с частицами кокса или антрацита по реакции:



С этой целью цементная ШП озонное дутье. Часть воздуха, необходимого на горение, поступает через зону охлаждения подогретым, а другая часть поступает непосредственно в зону обжига по периферии шахты. В центральную часть шахты предусмотрена подача чистого кислорода.

### Основы теплотехнических расчетов шахтных печей

Используются два метода расчета шахтных печей – аналитический и графический.

Аналитический метод имеет следующую последовательность расчетов.

По заданным исходным данным: производительности печи, химическому составу обжигаемого материала, параметрам обжига (температура обжига, уходящих газов, выгружаемой извести, степень обжига материала) составляются:

- 1) Материальный баланс процесса обжига материала;
- 2) Рассчитывается продолжительность обжига с учетом условий теплообмена;
- 3) Ведется расчет конструктивных размеров печи (объем шахты, средний диаметр, плоскостной и объемный съемы, высота зон);
- 4) Проводится расчет горения топлива;
- 5) Составляются тепловые балансы по зонам печи и определяется температура газов и материала, удельный расход топлива, теплоты);
- 6) Составляются сводные балансы печи: материальный и тепловой по зонам с подстановкой величины удельного расхода топлива;
- 7) Рассчитываются удельные расходы теплоты, условного топлива и КПД печи;
- 8) Рассчитывается аэродинамика печи и подбираются дымососы;
- 9) Ведется подбор загрузочных и разгрузочных устройств.
- 10)

(Роговой, Кондакова, Сагановский. Расчеты и задачи по технологическому оборудованию предприятий ПСМ)

### **Вращающиеся печи для производства вяжущих веществ**

ВП широко распространены в производстве извести и цемента. Ими производится около 80% всех вяжущих веществ.

ВП является печью непрерывного действия, работает по принципу противотока и используется для мокрого, сухого и комбинированного способов производства. Работает на всех видах топлива при их факельном сжигании.

Основной частью печи является вращающийся стальной барабан с приводом, футерованный внутри огнеупором и опирающийся через бандаж на роликовые

опоры. Диаметр барабана – 3–7 м, длина – 60–230 м. Барабан расположен под углом 3–4° к горизонту, скорость вращения – 0,6 – 1,2 об/мин. С верхнего конца печи (холодного) подается сырье для обжига, с нижнего (горячего конца) – выгружается обожженный материал. Материал перемещается по длине печи благодаря уклону и вращению барабана. Топливо и воздух подаются в нижний конец печи. После выгрузки материала из печи он подается в холодильник.

### Конструктивные элементы печей

#### Корпус печи

Корпус печи выполнен из последовательно соединенных встык сваркой металлических обечаек – колец, изготовленных из мартеновской стали толщиной 30–70 мм. В местах расположения опор на барабане с помощью специальных башмаков укреплены массивные стальные кольца шириной 800 – 1300 мм и толщиной 350 – 400 мм, называемые бандажами. Приблизительно в середине барабана на него надето венцовое колесо.

Барабан при вращении подвергается механическим воздействиям на изгиб, кручение и тепловым деформациям. Наибольшее напряжение испытывают бандажные обечайки. В холодном конце печи корпус нагревается до 30 – 60°С, в горячем – до 200 – 300°С.

#### Опорные устройства

Состоят из бандажей, одетых на корпус, и роликов, установленных на фундаменте.

Бандаж – литое или кованое стальное кольцо со сплошным сечением прямоугольной формы. Посадка бандажей на корпус – жесткая, с применением упоров, препятствующих перемещению бандажей в осевом направлении. Жесткость конструкции обеспечивается установкой подбандажных обечаек, к которым привариваются подкладки в виде пластин, имеющих ребра, которые препятствуют сдвигу бандажа в осевом направлении. В зависимости от длины печи число бандажей может быть от 3 до 8 и более. Каждый бандаж опирается на пару роликов, расположенных под углом 60° по отношению к оси печи.

Опорный ролик выполнен из стального литья. Ширина ролика на 50 – 100 мм больше ширины бандажа. Этим избегается свисание бандажа с ролика и неравномерный износ поверхностей при сдвиге барабана. Диаметр роликов – 1,4 – 1,7 м.

Вследствие вращения печи и ее уклона происходит сползание печи в осевом направлении. В старых конструкциях для удержания барабана одну или две пары опорных роликов перекашивали по отношению к бандажу. Это приводило к увеличению расхода электроэнергии на привод и преждевременному износу бандажей и роликов. Поэтому в новых конструкциях на опорных роликах используются не подшипники скольжения, а конические подшипники качения. В этом случае не происходит перекашивание роликов по отношению к корпусу. Для восприятия осевых усилий применяются упорные ролики с гидроцилиндром. С их помощью корпус со скоростью 1 м/ч перемещается в направлении, обратном осевому сдвигу.

#### Привод

Вращение барабана осуществляется при помощи венцовой шестерни, соединенной через редуктор с электродвигателем.

На печах длиной до 150 м устанавливается односторонний привод, больше 150 м – двухсторонний. Кроме основного привода печь имеет вспомогательный – для медленного вращения в период пуска, охлаждения и ремонта, а также на случай аварийного отключения основного источника питания. Мощность двигателя основного привода – 80 – 320 кВт, вспомогательного – 5 – 30 кВт.

#### Футеровка (обмуровка)

Назначение футеровки – обеспечение возможности проведения высокотемпературных процессов; защита исходных материалов, продуктов взаимодействия и печной среды от взаимодействия с окружающей средой; защита корпуса печи от теплового воздействия.

Футеровка выполняет 3 основные функции:

1) термо-технологическую, 2) теплотехническую и 3) механическую.

1) – обеспечивает локализацию высокотемпературного процесса, сохранение геометрической формы барабана и его прочность. Разогретая футеровка играет роль стабилизатора температуры в печи. Она сглаживает неравномерность подачи топлива, исключает прекращение технологического процесса при кратковременном прекращении подачи топлива.

2) – обеспечивает возможность получения высоких температур; снижает потери теплоты в окружающую среду; обеспечивает защиту металлических конструкций от воздействия высоких температур; обеспечивает устойчивость пламени, придает ему требуемую форму.

3) – обеспечивает передвижение в заданном направлении исходных материалов продуктов реакции и печной среды.

Футеровка является неотъемлемым элементом системы

Материал – среда – футеровка

Для футеровки используются кислые, щелочные и нейтральные огнеупоры. Характерна их способность при высоких температурах вступать в реакцию с материалом и окружающей средой (кислые со щелочным и наоборот).

Кислые огнеупоры – динасовые, шамотные, корундовые.

Основные – магнезиальные, доломитовые, хромомagneзитовые.

Нейтральные – графитовые, углеродистые, карбидкремниевые.

#### Общие требования к огнеупорам

1) Химическая устойчивость к действию расплава при высоких температурах.

2) Термостойкость и огнеупорность.

3) Износостойкость и механическая прочность.

Низкотемпературные зоны печи футеруются шамотным огнеупором, высокотемпературные – магнезитовым и хромомagneзитовым огнеупорами. За счет образования жидкой фазы в высокотемпературной зоне печи футеровка покрывается защитным слоем обмазки толщиной 100 – 200 мм, что повышает срок ее службы. Срок службы футеровки в зоне высоких температур составляет 300 – 400 суток, на лучших заводах – до 2 лет, в зоне низких температур – несколько лет. Холодный участок печи (зона испарения) может быть футерован огнеупорным бетоном (шамот на жидком стекле). При кладке огнеупорного кирпича в качестве

связки используют составы на основе цемента-клинкера, цемента-шамота, шамота - жидкого стекла.

Магнезитовые и доломитовые огнеупоры при температуре меньше 600°С поглощают пары H<sub>2</sub>O, что ведет к разрушению. Шамотная футеровка поглощает щелочные соединения, что приводит к разбуханию и отслаиванию футеровки. Огнеупоры, содержащие в своем составе хромиты, могут восстанавливаться в восстановительных средах при температуре > 1600°С, а при температуре < 1600°С могут окисляться. Эти явления сопровождаются усадкой или ростом объема футеровки, т. е. при неоднократном нагреве-охлаждении материал разрыхляется и приобретает хрупкость. Поэтому термостойкость составляет 5 – 6 циклов.

За рубежом используются корундовые огнеупоры, содержащие около 70% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Современные тенденции проведения футеровочных работ заключаются в замене штучных огнеупорных кирпичей огнеупорными блоками. При этом срок службы футеровки увеличивается в 7 – 8 раз.

#### Уплотнительные устройства

Их устанавливают между вращающимися концами корпуса печи и примыкающим к ним неподвижным частям: с горячей стороны – между разгрузочным концом и откатной головкой, с холодной – между загрузочным концом и дымовой камерой.

Назначение – сократить подсос холодного воздуха из окружающей среды через кольцевые зазоры.

Разрежение в холодном конце печи значительно больше, чем в горячем. Поэтому уплотнительные устройства здесь должны быть более эффективными. В холодном конце печи для уплотнения используют прижатую тросом прорезиненную ленту.

Лента охватывает корпус печи и скользит по нему при вращении. Трос перебрасывается через блоки и натягивается свободно подвешенными грузами с двух сторон или только с одной стороны.

Со стороны горячего конца печи используются лабиринтные уплотнения.

Лабиринтное уплотнение состоит из двух или трех пар концентрически установленных колец, неподвижных на неподвижной части и жестко установленных на вращающемся корпусе. Обе группы колец заходят друг в друга и образуют лабиринт, создающий аэродинамическое сопротивление.

#### Разгрузочная головка печи

Со стороны выгрузки материала печь имеет откатную головку. Она состоит из сварного каркаса сварной конструкции, футерованного внутри огнеупором.

Корпус откатной головки устанавливается на тележке. На передней стенке головки устанавливается форсунка или горелка. Рядом с ней находится люк для наблюдения за процессом обжига.

### Устройства для охлаждения печи

Для повышения стойкости футеровки печи, предохранения корпуса от перегрева печь в зоне спекания охлаждают. Применяют устройства для воздушного и водяного охлаждения. Охлаждению подвергают участок печи со стороны горячего конца, равный 6 диаметрам печи. Воздух и воду затем используют для технологических целей.

### Печные агрегаты мокрого способа производства цементного клинкера и извести

Мокрый способ производства предусматривает обжиг во вращающихся печах искусственно приготовленных суспензий (шламов) с влажностью 36-44%.

Вращающиеся печи для мокрого способа производства клинкера и извести можно классифицировать следующим образом:

- 1) Длинные печи с отношением  $L/D > 30$ , с внутренними теплообменными устройствами, без запечных теплоутилизаторов (преимущественно для получения клинкера);
- 2) Короткие печи с отношением  $L/D < 30$  без внутренних теплообменных устройств с запечными теплоутилизаторами;
- 3) Короткие печи с отношением  $L/D < 30$  без запечных теплоутилизаторов, с внутренними теплообменными устройствами (преимущественно для получения извести);

Из длинных печей преимущественно применяются печи следующих размеров и производительности:

4×150м	4,5×170	5×185
35т/ч	50т/ч	75т/ч

Наибольшее распространение имеют печи

Схема печного агрегата с печью 5×185м

1-пылевая (дымовая) камера

2-течка

3-бандаж

4-корпус печи

5-устройство возврата пыли

6-венцовая шестерня

7-разгрузочная головка печи

## 8-охладитель(холодильник)

Шлам поступает из сырьевого цеха, дозируется с помощью шлампитателя и по сливной трубе (или течке) стекает в печь, перемещается в ней, и, пройдя 6 зон тепловой обработки раскаленными газами, превращается в клинкер. В охладителе (или холодильнике) он охлаждается воздухом с  $1100-1200^{\circ}\text{C}$  до  $90-100^{\circ}\text{C}$  и выгружается. Нагретый воздух используется в качестве вторичного воздуха на горение топлива. Остальная его часть теплоутилизируется и очищается.

Средний пылеунос в мощных печах составляет 8-10%. Пыль может быть возвращена в печь разными способами:

Под шлам с холодного конца печи; в зону спекания; под слой материала в зоне подогрева за цепной завесой.

Удельный расход теплоты в длинных печах мокрого способа составляет 5500-6300 кДж/кг клинкера. Газы из печи выходят с температурой  $150-200^{\circ}\text{C}$ .

Для улучшения теплообмена и снижения расхода теплоты печи мокрого способа производства оборудуются встроенными внутренними теплообменными устройствами. К ним относятся:

Цепные завесы, металлические и керамические теплообменники. Они устанавливаются в зоне сушки и подогрева.

### Цепные завесы

При вращении печи цепи периодически омываются шламом и газовыми потоками. Находясь в газовом потоке, цепи аккумулируют теплоту, а затем часть ее отдают шламу. Цепи улучшают контакт газового потока со шламом, при этом интенсифицируется процесс испарения влаги шлама. Во время сушки шлам изменяет свои реологические свойства и из жидкотекучего становится вязким, а затем сыпучим.

В связи с этим по длине зоны сушки изменяется и теплотехнический режим работы цепей. В зоне жидкотекучего шлама на цепях образуется сравнительно тонкая, непрерывно обновляющаяся пленка шлама. В этом режиме цепи работают частично по регенеративному циклу, т.е. получают теплоту от газового потока и отдают ее при погружении в шлам. В той же части зоны сушки, где на цепях образуется устойчивая пленка, роль их как теплопередающей поверхности в генерации теплоты уменьшается, и тем больше, чем толще становится пленка шлама на них.

В этих условиях цепи увеличивают поверхность непосредственного контакта шлама с газовым потоком. При работе цепей в регенеративном цикле в первом периоде на стадии сушки средняя температура их будет выше. Чем высушиваемого шлама, но ниже чем газового потока. Во втором периоде температура цепей должна быть примерно равна температуре шлама.

Когда шлам теряет пластические свойства и становится сыпучим (влажность 8-12%), цепи не обволакиваются шламом и работают полностью в регенеративном цикле: по выходе из шлама они нагреваются от теплоты газового потока, а при попадании в материал отдают часть этой теплоты. При этом интенсивность теплообмена между цепями и относительно сухим материалом в несколько раз ниже интенсивности теплообмена с жидким шламом. На этом участке печи будет выше температура газового потока, возрастет средняя температура цепей, которая будет приближаться к температуре газового потока.

Свободновисящая навеска цепей используется на различных вращающихся печах, но преимущественно для шламов с высокой начальной влажностью. Эта навеска цепей:

- 1) проста по конструкции
- 2) малочувствительна к изменению реологических свойств шлама в процессе сушки.

Эффективность ее как теплообменного устройства возрастает по мере увеличения плотности навески

Недостаток:

Высокое гидравлическое сопротивление, приводящее к перерасходу электроэнергии и установке дымососов повышенной мощности.

Способы навески свободно висящих цепных завес:

- в шахматном порядке на кольца, установленных на равных расстояниях одно от другого.

- на продольных полках, несколько смещенных по отношению к оси печи.

- коридорная система.

Более распространенной является навеска на полках, которая способствует продвижению вязкого шлама вдоль печи.

Гирляндные цепные завесы могут быть двух видов.

Первый предусматривает навеску цепей на кольцах, приваренных к корпусу печи на равном расстоянии одно от другого, второй – навеску в виде трехзаходного винта.

Угол смещения гирлянды является важной характеристикой завесы и составляет около  $120^{\circ}$ .

У гирляндной цепной завесы различают два участка. На первом (по ходу шлама) длина цепей больше, поэтому они сильнее провисают; на втором участке цепи короче. Это создает лучшие условия обеспыливания газового потока. Для повышения роли цепей как пылеуловителей на первом участке навески увеличивают ее плотность. На втором участке (одна треть длины завесы) гирлянды укорочены для того, чтобы способствовать сохранности образующихся гранул шлама. При этом содержание гранул размером 3-7 мм после цепной завесы увеличивается на 60-70%. Равномерность гранулометрического состава резко снижает содержание пыли в материале и газовом потоке. Данная конструкция гирляндной навески цепей эффективна для шлама с хорошей текучестью. При плохой текучести замазываются цепи и шлам переливается в пыльную камеру.

При проектировании цепных завес учитывается интенсивность теплообмена в холодной и горячей частях цепной завесы, величина которой различна.

Второй важной характеристикой является плотность навески, предельное значение которой принимается из условий ее достаточной транспортирующей способности.

Длину гирлянды выбирают такой, чтобы цепи не касались футеровки печи, т.к. это приведет к разрушению гранул материала и ухудшению условий теплообмена в последующих зонах печи. Поверхность цепей рассчитывается таким образом, чтобы высушенный материал выходил из цепной завесы с влажностью 8-12%. При большей влажности увеличивается расход топлива на обжиг и снижается

производительность печи. При меньшей – материал пересушивается и повышается пылеунос. Общая длина цепей – до 2 км, общая площадь – 1500м<sup>2</sup>.

Ячейковые металлические и керамические теплообменники устанавливают в той части печи, где шлам становится сухим и заполнение им поперечного сечения печи находится в пределах 7-15%, а также снижается интенсивность нагревания материала.

Схемы ячейковых теплообменников

Металлические

Керамические

В ячейковых теплообменниках сечение печи разделяется на ячейки, по которым вдоль полок теплообменника проходит разделенный поток обжигаемого материала. В результате значительно увеличивается внутренняя поверхность теплообмена в печи и интенсифицируется передача теплоты за счет регенеративного цикла. Полки теплообменников получают теплоту от газового потока. А потом передают аккумулированную теплоту материалу путем теплопроводности и излучения.

Разделение обжигаемого материала на несколько потоков уменьшает термическое сопротивление слоя и улучшает перемешивание материала в слое.

По характеру транспортирования и перемешивания материала между керамическими и металлическими теплообменниками принципиальной разницы нет. Существенным отличием керамического теплообменника является повышенное гидравлическое сопротивление вследствие значительного сужения поперечного сечения печи.

Конструктивным недостатком обоих типов теплообменников является их значительная масса. Которая может привести к деформации корпуса печи.

Технологический недостаток – повышенное пылеобразование на участке установки печи, что ограничивает их широкое применение.

Теплообменники в виде пересыпающих лопастей по устройству представляют собой ряд лопастей из металла или керамики. К ним относится также рифленая футеровка. Они обеспечивают высокую интенсивность теплообмена при взвешивании значительной части его в газовом потоке. Однако при этом



происходит разрушение гранул материала и увеличение пылеуноса. Их использование эффективно при правильном сочетании с плотной цепной завесой.

Экранирующие теплообменники представляют собой грибовидные металлические башмаки, устанавливаемые под керамической футеровкой. Используются редко. Их установка увеличивает поверхность теплоотдачи и изменяет теплопроводность поверхностного слоя футеровки, который непосредственно участвует в регенеративном цикле передачи теплоты. При этом количество переданной материалу теплоты возрастает на 20-25%.

Недостаток – замазывание их поверхности материалом, что резко снижает их тепловую эффективность.

Циклоидные теплообменники устраняют недостатки предыдущих конструкций. Представляют собой набор трапециевидных лопастей, отвальцованных по определенному радиусу, обеспечивающему скольжение слоя материала по внешней его поверхности практически без отрыва. Благодаря этому пыление снижается до минимума. Элементы теплообменника устанавливают в печи выпуклой стороной в направлении геометрической оси в коридорном порядке по шесть рядов в поперечном сечении. Угол наклона оснований элементов к образующей корпуса печи – 15-23°.

Теплообменники надежны в работе. Просты в монтаже, обеспечивают стабильность теплового и технологического режимов печей. Увеличивают производительность печей на 5%, снижают расход топлива на 7% при общем снижении пылеуноса.

#### Запечные теплообменные устройства мокрого способа производства.

Запечные теплообменники при мокром способе производства используются редко, т.к. наиболее распространены длинные вращающиеся печи с достаточной утилизацией теплоты за счет внутренних теплообменных устройств. При использовании в мокром производстве коротких печей температура отходящих газов составляет 500–600°C, поэтому для улучшения использования теплоты на печах устанавливают запечные теплообменники.

Запечный концентратор шлама представляет собой вращающийся металлический барабан длиной 3–4,5м, диаметром 2–4м, закрытый с торцов глухими днищами. Цилиндрическая поверхность аппарата выполнена в виде кольцевой решетки, собранной из колосников с зазорами 60–70мм, скрепленных продольными балками. Решетчатый барабан заключен в кожух, имеющий нижнее отверстие для приема из печи дымовых газов и загрузки высушенного материала в печь. Отработанные газы отводятся через верхнее отверстие в кожухе. Половина объема барабана занята загруженными в него стальными или чугунными кольцами размером 160×125мм. Шлам поступает в концентратор с помощью питательного устройства, растекается внутри барабана по насадке и образует на ее поверхности пленку, омываемую горячими газами, которая подсушивается. В результате трения колец друг от друга высохший материал отделяется от поверхности колец и по лотку поступает в печь. Влажность материала после концентратора составляет 8–12%. Удельный расход теплоты на обжиг снижается на 15–20%.

Недостатки:

1. Большой пыле унос, что требует мощной системы аспирации.
2. Сложность в эксплуатации.
3. Быстрый износ колосников и балок .

Температура отходящих газов на выходе из концентратора 150–200%, скорость вращения барабана – 1,5–1,6 об/мин.

### Структура теплового баланса концентратора

Приход

$g_1^п$  –с дымовыми газами

$g_2^п$  –с шламом

Расход

$g_1^р$  –на испарение влаги

$g_2^р$  –с высушенным материалом

$g_3^р$  –с отходящими газами

$g_4^р$  –потери в окруж. среду.

### Внутренний концентратор шлама

Служит одновременно и обеспыливателем газового потока представляет собой металлический барабан, соединенный с загрузочным концом печи и вращающимся с ней. Диаметр барабана равен 1,5 диаметра печи.

Цепи повешены внутри барабана в виде спиралеобразных гирлянд. Газы и шлам движутся внутри концентратора по спиралеобразной траектории навстречу друг другу. При этом достигается большая поверхность теплообмена, и влага интенсивно испаряется. Влажность шлама снижается с 40 до 10–15%. Данное устройство позволяет уменьшить размеры печи на 20–30% по сравнению с печью с обычной навеской цепей.

### Фильтр–пресс

Экономия теплоты при мокром способе производства может быть достигнута путем предварительного механического обезвоживание шлама в фильтр–прессах до 18–20% остаточной влажности. Их производительность составляет 50–60т/ч по клинкеру или извести.

Камерный пресс–фильтр периодического действия состоит из набора вертикально расположенных фильтровальных плит с уложенной между ними фильтровальной тканью. Часть влаги отжимается и отводится, а кек подается в печь. Удельный расход теплоты при использовании фильтр –пресс снижает на 20–25% по сравнению с длинными печами с внутренними теплообменниками – примерно с 6300 до 4600 кДж/кг клинкера.

**Недостаток** фильтр – пресса – значительный расход фильтровальной ткани.

**Достоинство** – механическое обезвоживание –самый дешевый способ удаления влаги.

При использовании в качестве запечных теплообменников концентраторов шлама и фильтр– прессов осуществляется полусухой (комбинированный) способ

производства, который является перспективным направлением реконструкции действующих линий мокрого способа, работающих на шламах с высокой влажностью.

#### Вращающиеся печи сухого способа производства извести и цементного клинкера.

Главным конструктивным отличием печей сухого способа производства является меньшее соотношение  $L/D$ , составляющее обычно 12-20. Венцовая шестерня ставится ближе к холодному концу печи. В связи с тем, что эти печи питаются сухой сырьевой смесью, температура отходящих газов у них составляет около 900-1100 °С. Поэтому они эксплуатируются только с запечными теплообменниками, в которых происходят процессы сушки, подогрева и частично декарбонизации. Более высокотемпературные процессы протекают непосредственно в печи. Удельный расход теплоты в лучших современных печных агрегатах сухого способа производства клинкера составляет 3100-3200 кДж/кг, т.е. практически вдвое меньше, чем у печей мокрого способа производства. Сухой способ производства предусматривает следующие запечные теплообменные устройства:

1. Слоевые (конвейерный кальцинатор системы «Леполь»);
2. Циклонные;
3. Шахтные;
4. Шахтно-циклонные;

Наибольшее распространение в СИГ получили печи следующих размеров:

1. 4×60 м с конвейерным кальцинатором, производительность 30 т/ч, расход теплоты-4000 кДж/кг клинкера.
2. 7/6,4×95 м с циклонными теплообменниками, производительность-125 т/ч, расход теплоты 3600 кДж/кг.
3. 5×75 м с ЦТ, производительность 70 т/ч, расход теплоты 3800 кДж/кг.
4. 4,5×80 м с ЦТ и декарбонизатором, производительность 150 т/ч, расход теплоты 3100-3500 кДж/кг.

#### Запечные теплообменные устройства сухого способа производства извести и цементного клинкера. Конвейерный кальцинатор.

Используется в печных агрегатах полусухого (клинкера) и сухого (известь) способов производства. Требуется предварительного гранулирования сырья либо использования плотных пород (в производстве извести). Работает по двум схемам – с однократным и двукратным прососом газов. В последнем случае достигается более существенная экономия. Расход теплоты составляет 3700-3800 кДж/кг клинкера, производительность – до 3000 т/сут.

Колосниковая решетка состоит из шарнирно соединенных стальных звеньев, образующих ленту шириной 3-4 м и длиной 15-25 м. Она помещена в камеру, футерованную внутри огнеупором. Лента движется со скоростью 25-50 м/ч. Камера разделена на горячую и холодную части поперечной перегородкой. Горячая часть камеры соединяется с печью, холодная – с дымососом.

При производстве клинкера сырьевая смесь, приготовленная из пластичного сырья, предварительно гранулируется. Диаметр гранул – 10-15 мм, влажность – 12-18 %. Гранулирование производится на грануляторах тарельчатого типа. Тарелка наклонена к горизонту на 35-60°. Таким же образом может производиться известь из рыхлых мелов. При обжиге известняка используется его фракция того же размера. Материал поступает на решетку и движется вместе с ней навстречу отходящим из печи газам, имеющим температуру 900-1100°C. Толщина слоя материала 150-200 мм. Газы просасываются вентилятором через слой гранул и снижают свою температуру до 300°C. Материал нагревается до температуры 800-850°C и декарбонизируется на 10-20%, затем поступает в печь. Газы, имеющие температуру 300°C, освобождаются от пыли в циклонах и вентилятором нагнетаются в верхнюю часть холодной камеры, в которой вновь просасываются через слой сырья, подсушивая его и подогревая до 100-150°C. При этом газы охлаждаются до температуры 120-140°C и идут на пылеочистку.

Достоинства:

1. Низкий расход теплоты.
2. Небольшие габаритные размеры.

Недостатки:

1. Сложность конструкции, большая металлоемкость.
2. Использование сырья в виде гранул либо кусков.
3. Нестабильность технологического режима, которая выражается в пригорании решетки и просыпи сырья.

#### Циклонные теплообменники.

Наиболее широко используются в настоящее время имеют различное конструктивное исполнение, но обязательно включают расход из 4 последовательно соединенных циклонов.

#### Схема четырехступенчатого циклонного теплообменника.

Принцип работы основан на подогреве материала и его частичной декарбонизации во взвешенном состоянии благодаря интенсивному теплообмену в циклонах и газоходах.

Сырьевая мука с размером частиц 1-2 мм и влажностью до 1% питателем через дозатор подается в газоход батарейного циклона 4 ступени. В нем материал увлекается газовым потоком из циклона 3 ступени с температурой 400°C, вносится в батарейный циклон 4 ступени, отделяется от газов и поступает в газоход циклона 3 ступени, уже нагретый до температуры 250-350°C. Затем подхватывается газами с температурой 500-600°C, выходящим из циклона второй ступени и подается в циклон третьей ступени. Из него материал попадает в газоход циклона второй ступени, в циклоне отделяется от газов и попадает в газоход первой ступени, где также отделяется от газов и поступает в печь. За время движения материала, составляющее 20-30 с. он нагревается до 700-800°C. Газы из печи входят в теплообменник с температурой 1000-1100°C, а выходят из него с температурой 300°C. После этого они очищаются в электрофилтрах и выбрасываются в атмосферу. Циклоны первой и второй ступени футеруют изнутри огнеупором, а третья и четвертая ступени – теплоизолируют снаружи. Сырьевая мука, проходя

последовательно через циклоны, декарбонизируется на 25-30%. В каждой ступени теплообмена между газовым потоком и материалом теплообмен происходит при прямоточном движении с очень высокой интенсивностью нагревания частиц материала, что приводит к постепенному выравниванию температур газовой среды и материала. Температура отличается по ступеням приблизительно на 200<sup>0</sup>С.

Увеличение числа ступеней циклонов в теплообменнике приводит к более полной утилизации теплоты, но при этом увеличиваются затраты электроэнергии на преодоление сопротивления, что не всегда оправдывается экономически. Однако, за рубежом разработан пятиступенчатый теплообменник. Затраты электроэнергии снижены при этом за счет использования циклона с низкой потерей давления. Температура отходящих газов при этом составляет 220 – 250<sup>0</sup>С. Кроме того, использование пятой ступени позволяет сократить длину печи.

На печах большой производительности обычно устанавливаются 2 ветви теплообменников.

Для герметизации системы циклонов в нижней их части на течках установлены самозакрывающиеся затворы – мигалки. При достижении определенного давления материала затворы открываются, выпускают материал и автоматически закрываются. При подсосе в циклоны уже 3% газов из расположенных ниже газоходов тепловой КПД циклонов падает на 30-40%.

Достоинства:

1. Простота конструкции.
2. Надежность в работе из-за отсутствия движущихся частей.
3. Исключение необходимости гранулирования частей шихты и использование порошкообразной сырьевой муки.
4. Низкий удельный расход теплоты 3400 – 3600 кДж/кг
5. Более высокий тепловой КПД - 55-65%.
6. Более высокий удельный съем клинкера с 1м<sup>3</sup> печи.

Недостатки:

1. Чувствительность к изменению режима работы (зависание материала в циклонах; образование циклонов наростов из-за изменения расхода топлива и подачи материала).

2. Повышенный удельный расход электроэнергии.
3. Недостаточная степень очистки газов.

Этот недостаток диктует необходимость направлять отходящие газы в сушильно-помольное отделение.

4. Чувствительность к изменению химического состава сырьевой муки.

#### Структура теплового баланса ЦТ.

Приход:

1. С отходящими из печи газами.
2. С подсосанным воздухом.
3. С пылеуносом из печи.
4. С сырьевым материалом, поступающим в теплообменник.

Расход:

1. На удаление остаточной физической влаги.

2. На удаление кристаллогидратной влаги и разложение глинистых минералов.
3. На разложение 25-30%  $\text{CaCO}_3$ .
4. С нагретым материалом.
5. С отходящими дымовыми газами.
6. Потери в окружающую среду.

#### Шахтно-циклонный теплообменник.

Шахтно-циклонный теплообменник действует по принципу противотока и прямотока. Отличается от циклонного тем, что циклоны 1 и 2 ступени заменены шахтой. В шахте осуществляется противоточный теплообмен, что повышает его эффективность, в циклонах – прямоточный.

Пневмотранспортом мука подается в газопод, объединяющий 1 и 2 ступени циклонов. Поток газов она выносится в группу циклонов 2 ступени, осаждается и направляется в шахту. В группе циклонов 1 ступени, непосредственно соединенной с шахтой, улавливается выносимая из шахты пыль и вместе с сырьем направляется обратно в шахту, то есть каскад циклонов является также пылеосадителем.

Частицы пыли размером менее 10 мкм улавливаются в электрофильтрах. Газы, выходящие из печи, закручиваются в шахте по спирали восходящего газового потока с целью интенсификации теплообмена. Высота шахты составляет 20 – 28 м.

Газы из печи поступают в шахту с температурой около  $1000^{\circ}\text{C}$ , а выходят при  $340 - 360^{\circ}\text{C}$ . Материал нагревается в шахте до  $800 - 820^{\circ}\text{C}$ . Шахта металлическая, футерована внутри огнеупором, каскады циклонов снаружи теплоизолируются. На печах большой мощности устанавливаются 2 параллельные ветви теплообменников. Степень декарбонизации – 35 – 40%.

Достоинства:

1. Низкое аэродинамическое сопротивление запечной системы.
2. Ликвидация вероятности образования сваров в циклонах 1 и 2 ступеней.
3. Увеличение производительности печи на 10 – 15%.
4. Снижение расхода теплоты на обжиг ( $3200 - 3300^{\circ}\text{C}$ ).

Недостатки:

1. Достаточно большой пылеунос материала.

#### Шахтный теплообменник.

Теплообменник является почти полностью противоточным, за исключением верхней ступени, которая с целью отделения пыли выполнена в виде двух циклонов. Он состоит из верхней двойной циклонной ступени с трактом для восходящего потока и цилиндрической шахты. Шахта с помощью сужений разделена на четыре камеры. Конусные сужения необходимы для более равномерного распределения опускающейся сырьевой муки. Т.о., теплообменник работает в 5 ступеней. Сырьевая мука вводится между верхней камерой шахты и циклонной ступенью, уносится вверх газовым потоком, подогревается, сепарируется от газа в циклонах и попадает в верхнюю камеру шахты, откуда спускается в нижние камеры навстречу потоку газа и затем во вращающуюся печь. Температура отходящих дымовых газов  $350^{\circ}\text{C}$ , на выходе из печи около  $1000^{\circ}\text{C}$ . Удельный расход теплоты в шахтных теплообменниках составляет 3400-3600



кДж/кг. Большое поперечное сечение шахтных теплообменников и соответственно низкая скорость газового потока служат причиной относительно низкого аэродинамического сопротивления – около 2500 Па, причем на шахту приходится 40% потерь давления, на циклоны и газоход – 60%. Степень декарбонизации – 40%. Производительность – до 1000 т/сут. Высота шахты – до 50 м, диаметр – 6-7 м.

### Теплообменники с байпасной системой.

Одной из основных причин разрушения бетона является реакция между щелочами цемента и заполнителями, содержащими вредные включения: халцедон, тридимит, кристобалит, цеолит, обсидиан. Поэтому максимальное содержание щелочей в цементе ограничивается 1%. В печах с циклонными теплообменниками в процессе обжига в системе печи и соответственно в клинкере остается больше щелочных оксидов, чем в печах других систем. В ходе обжига щелочные оксиды из глинистых минералов сырьевой муки и из топлива переводятся в состав клинкера:  $K_2O$  в количестве до 2,2% и  $Na_2O$  в количестве до 0,7%. При температуре выше 800 °С щелочи в печи начинают возгоняться. Наиболее температуроустойчивая часть щелочей остается в клинкере в составе следующих соединений  $KC_{23}S_{12}$ ;  $NaC_8A_3$ ;  $KC_8A_3$ ;  $K_2SO_4$ ;  $Na_2SO_4$ . Испарившиеся щелочи переходят в более холодные зоны печи, где конденсируются на холодном материале. В печах с теплообменниками это наблюдается уже на 4-ой и 3-ей ступенях теплообменника. Особенно сильно конденсируется  $K_2O$  – до 81–97%. Это значит, что от 3 до 19% щелочей удаляются из установки. Следовательно, пыль, выносимая из теплообменника отходящими газами, содержит много щелочей и не может быть возвращена в печь.

Щелочной конденсат вместе с сырьевой смесью далее попадает в зоны печи с высокой температурой, где снова испаряется. При этом возникает так называемый внутренний кругооборот, или циркуляция щелочей, в отличие от так называемого внешнего щелочного кругооборота, возникающего в результате возврата в печь вместе с сырьевой мукой пыли, уловленной из отходящих газов и содержащей щелочи. При внешнем кругообороте часть щелочей конденсируется в 3-ей и 4-ой ступенях, что приводит к образованию щелочных наростов, приводящих к нарушению теплового и технологического режима работы теплообменника и всей системы в целом. Особенно вероятен такой вариант при использовании сырья с высоким содержанием щелочей, что характерно для нашей сырьевой базы.

Для предотвращения данного явления используется байпасная система. При отводе части отходящих от печи газов мимо теплообменника через так называемый байпасный клапан, расположенный в пылевой камере печи, в отдельный байпасный тракт. Можно снизить щелочной кругооборот и тем самым уменьшить содержание щелочей в клинкере и предотвратить образование наростов и настывей в теплообменнике.

Печная пыль с высокой концентрацией щелочей, отводимая с помощью байпасной системы, не может быть возвращена в печь. Она должна быть удалена или подвергнута выщелачиванию.

В связи с необходимостью дополнительных затрат на устройство байпасной системы и ее отрицательным влиянием на тепловую эффективность печи через байпасную систему отводят не более 25% объема печных газов. При объеме байпаса более 25% щелочность снижается относительно мало. В большинстве

случаев объем байпаса 3–10 вполне достаточен. При работе установки с байпасной системой расход теплоты повышается примерно на 16–20 кДж/кг клинкера на каждый процент объема отводимого газа. Увеличивается и расход электроэнергии – в среднем на 2 кВт·ч/т клинкера независимо от объема отводимого газа. Количество пыли, отводимое байпасной системой, равно примерно 1% от массы сырьевой муки, загружаемой в теплообменник, на каждые 10% объема отводимого газа.

Температура байпасных газов у клапана составляет около 1100 °С. Химические свойства щелочных соединений требуют разбавления байпасных газов холодным воздухом до достижения температуры 475 °С. Только при этой температуре можно начинать их охлаждение до 285 °С с помощью раскаливания воды; такая температура допускается на входе в рукавный фильтр.

В результате многочисленных экспериментов установлено следующее:

- 1) Степень возгонки щелочей возрастает с повышением температуры в зоне спекания печи, а также с удлинением времени пребывания в ней материала.
- 2) Степень возгонки щелочей из сырьевой муки последовательно уменьшается в ряду исходных минералов, содержащих щелочные оксиды: иллит > слюда > ортоклаз.
- 3) При повышении концентрации  $\text{SO}_3$  в сырьевой муке и  $\text{SO}_2$  в отходящих газах летучесть щелочей и их циркуляция снижаются в связи с образованием  $\text{K}_2\text{SO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .
- 4) Наличие водяного пара в печных газах и особенно ионов хлора в сырьевой муке и печных газах способствуют повышению летучести щелочей.

Существуют различные байпасные системы. Схема байпасной системы теплообменника. Щелочная пыль из байпасного газа осаждается в отдельных циклонах, а обеспыленный воздух смешивается с основным газовым потоком. Пыль с высоким содержанием щелочей удаляется или подвергается выщелачиванию. Существуют и другие байпасные системы. Щелочная пыль из байпасного газа осаждается в отдельных циклонах, а обеспыленный газ подается к специальному электрофильтру для вторичной очистки. В этом случае основной поток отходящих газов более пригоден для сушки сырья, чем в предыдущей установке. Ко второму варианту байпасный газ подается непосредственно в специальный обеспыливающий агрегат.

#### Вращающаяся печь с циклонным теплообменником и декарбонизатором

Дальнейший поиск повышения производительности и снижения удельного расхода теплоты на единицу продукции привел к созданию печной системы, в которой зона декарбонизации была вынесена за пределы печи – в запечный реактор-декарбонизатор. Всего в мире эксплуатируется около 23 типов декарбонизаторов, которые по принципу действия и основным характеристикам разделяются на 5 групп.

На данный момент печи с декарбонизатором обеспечивают более 25% выпуска клинкера. В СНГ используются декарбонизаторы типа СМЦ-29 наиболее распространенной системы RSP.

Декарбонизатор встраивается в систему циклонных теплообменников между 2-ой и 1-ой ступенями циклонов.

Принцип действия:



Воздух из охладителя клинкера с температурой около 600 °С по воздуховоду подводится к декарбонизатору. Часть воздуха тангенциально подается в вихревой кальцинатор, а часть – в вихревую камеру сгорания. Сырьевая мука с температурой выше 600 °С из циклона 2-ой ступени по течкам попадает в воздуховоды вихревого кальцинатора и вносится в кальцинатор. В нем происходит интенсивный теплообмен между сырьевой мукой, газами и факелом горящего топлива (мазута) с достижением 45%-й степени декарбонизации. Эффективному теплообмену способствуют вихревой режим движения газов и сырья, обеспечивающий тесный контакт между горячими газами и частицами материала, а также высокая температура газовой среды. После кальцинатора пылегазовый поток с температурой 950 °С попадает в кальцинирующую шахту, где интенсивно перемешивается и потоком отходящих из печи газов с температурой 1000–1100 °С поднимается в газоход, а из него – в циклон 1-ой ступени.

После кальцинирующей шахты степень декарбонизации достигает 85–95%. Степень декарбонизации зависит от доли сжигаемого топлива в декарбонизаторе, которое составляет 60–65% от общего расхода топлива на получение клинкера. В циклоне 1-ой ступени происходит разделение газов и сырьевой муки. Сырьевая мука с температурой около 800–840 °С через течку, оснащенную мигалкой, поступает в печь. Работа вращающейся печи в данном случае сводится лишь к процессу клинкерообразования, что значительно повышает производительность – в 2 раза по сравнению с печами, оснащенными обычными циклонами теплообменниками. Время пребывания материала в декарбонизаторе – до 2 мин.

Декарбонизатор изготовлен из листовой стали и футерован внутри огнеупором. Циклоны 1-ой и 2-ой ступени футерованы более высокоогнеупорным материалом, т. к. по сравнению с циклонным теплообменником температура здесь выше. Более высокая температура достигается благодаря практически стехиометрическому количеству воздуха на горения, т. к. ввод топлива происходит тангенциально, при этом образуются закручивающиеся потоки.

В установках декарбонизатором удельный расход теплоты теоретически должен быть несколько выше, чем в печах, оборудованных циклонными теплообменниками, однако наблюдается обратное явление, что связано с тем, что удлиняется межремонтный период и обеспечивается увеличение производительности. Фактический расход теплоты в этих установках даже несколько ниже, чем в печах с другими запечными теплообменными устройствами.

Преимущества по сравнению с циклонными теплообменниками:

- 1) Увеличение производительности с 55 т/ч до 125 т/ч, а удельная производительность возрастает с 2 до 3,5- 4 т/(м<sup>3</sup>·сут).
- 2) Использование печей меньшего размера;
- 3) Возможность использования практически любого топлива, в том числе горючих отходов. При образовании золы необходимо учитывать ее присадку.
- 4) Снижение расхода топлива до 2950 кДж/кг, а тепловой КПД – 50-60%.

Недостатки:

- 1) Возможность перегрева и налипания материала на стенки декарбонизатора при нарушении синхронизации сжигания топлива в кальцинаторе и печи.

Сравнительная характеристика шахтных и вращающихся печей

<b>Вращающиеся печи</b>	<b>Шахтные печи</b>
<p>Степень заполнения – 10-12%, что приводит к ограничению степени контакта газов с материалом, увеличению длины и повышенному расходу топлива.</p>	<p>Материал занимает весь объем.</p>
<p>Барабан футерован 1 слоем огнеупорного кирпича, поэтому потери больше на 15-20%, что приводит к увеличению расхода топлива и теплоты.</p>	<p>Футеровка – 3 слоя.</p>
<p>Передача теплоты осуществляется в основном путем излучения, а также теплопроводностью и конвекцией, поэтому передачу теплоты улучшают применением запечных теплообменников.</p>	<p>Передача теплоты осуществляется в основном теплопроводностью и конвекцией.</p>
<p>Высоко механизированы, производительны и характеризуются минимальными затратами рабочей силы на обслуживание. Наблюдается более плавный переход температур, поэтому легче создать необходимый режим обжига.</p>	<p>Имеет место неравномерность распределения газов и теплоты по сечению печи и, соответственно, неравномерность обжига. Трудно обеспечить равномерную загрузку и выгрузку материала. Все это усложняет аэродинамику печи.</p>

Сопоставление технико-экономических показателей работы вращающихся и шахтных печей для производства цемента показывает, что:

- 1) Агрегатная производительность вращающихся печей выше в 15-20 раз;
- 2) Общие приведенные затраты энергии ниже на 10-15% (для печей сухого производства);
- 3) Выше качество цемента.

Преимущества шахтных печей:

- 1) Меньше общая материалоемкость (металл и огнеупоры);
- 2) Ниже удельная стоимость капиталовложений;
- 3) Выше удельный съем клинкера.

У известковых вращающихся печей по сравнению с шахтными:

- 1) Агрегатная производительность выше в 4-5 раза;
- 2) Более широкое использование сырьевых ресурсов (универсальность по сырью);
- 3) Лучшее качество извести.

Но:

- 1) Выше приведенные затраты энергии на 5-8%;
- 2) Выше металлоемкость в 2-3 раза.

По совокупности показателей более важными являются преимущества все же вращающихся печей.

### Холодильники вращающихся печей

Предназначены для окончательного охлаждения материала после выхода его из зоны охлаждения вращающейся печи и получения его с требуемым фазовым и минералогическим составом. Материал (известь или клинкер) охлаждаются воздухом, который поступает во вращающуюся печь для сжигания топлива. Холодильники выполняют роль тепловых утилизаторов и повышают тепловую эффективность печного агрегата.

Существуют четыре основных типа холодильников:

- 1) Барабанные;
- 2) Регуляторные;
- 3) Колосниковые;
- 4) Шахтные.

При оценке и выборе холодильника следует рассматривать следующие факторы:

- 1) Тепловой коэффициент полезного действия, определяемый отношением количества теплоты, отобранной у горячего материала и используемого для процесса обжига, к общему теплосодержанию материала:

$$\eta_{\text{тепл}} = \frac{A - B}{A} \times 100,$$

где  $A$ - общее теплосодержание материала;

$B$ - потери теплоты в холодильнике.

Величина  $B$  складывается из потерь теплоты с аспирационным воздухом, с материалом, выходящим из холодильника и потерь в окружающую среду с излучением и конвекцией. Тепловой КПД холодильников всех типов вращающихся печей находится в пределах 50-80%.

- 2) Разность температур между горячим клинкером, поступающим в холодильник, и вторичным воздухом, выходящим из него в печь. При равной тепловой эффективности лучшим является холодильник, подводящий с вторичным воздухом максимум теплоты в печь.

- 3) Степень охлаждения материала, измеряемая его температурой на выходе из холодильника. Эта температура колеблется для холодильников различных типов от 50 до 300°C.

4) Удельный расход энергии на работу холодильника. Этот показатель у барабанных и планетарных холодильников ниже, чем у остальных.

5) Расход воздуха на охлаждение. Объем воздуха для охлаждения материала в барабанных, планетарных и шахтных холодильниках ограничен величиной, необходимой для сжигания топлива в печи, хотя для необходимой степени охлаждения материала в таких холодильниках расход воздуха требуется больший. Поэтому материал, поступающий из таких холодильников, имеет более высокую температуру по сравнению с колосниковым холодильником. В колосниковом холодильнике низкая температура выходящего материала обусловлена большим расходом охлаждающего воздуха и более эффективным теплообменом. Избыточный теплый воздух применяется для сушки сырья или добавок и частично выбрасывается в атмосферу. В последнем случае он нуждается в очистке, что требует дополнительных затрат.

Наличие большого числа факторов затрудняет оценку холодильников, т.к. часто преимущество в одном отношении приходится компенсировать потери в другом.

#### Барабанные холодильники.

Это самый старый тип холодильников. В настоящее время используются для охлаждения извести. Ими оборудованы печи малой производительности (12-16 т/ч) длиной 60-90м. Представляет собой вращающийся барабан, находящийся под печью. Барабан имеет наклон 4-7%. Барабан и вращающаяся печь наклонены в разные стороны. Барабан опирается на два банджа и имеет самостоятельный привод через венцовую шестерню. Диаметр барабана- 1,2-2,5м, длина- 10-30м, частота вращения- 3-8 об/мин. Внутренняя поверхность барабана на 70% длины футерована огнеупорным кирпичом. Для эффективного теплообмена в барабане смонтированы внутренние теплообменные устройства из термостойкой стали и огнеупорных материалов- планки и пересыпные лопасти.

За счет разрежения в разгрузочной головке печи холодный воздух всасывается через открытый конец барабанного холодильника и проходит через него противотоком движению материала. При этом вторичный воздух нагревается до 400-750°С, а материал охлаждается с 1000-1200°С до 150-300°С. Вторичный воздух используется для сжигания топлива.

В печах сухого способа тепловой КПД барабанного холодильника составляет 55-75%, мокрого способа- около 78%. Это связано с тем, что в печи мокрого способа можно подавать больший объем воздуха из холодильника на горение, т.к. расход топлива и, соответственно, воздуха по мокрому способу выше. Это повышает тепловой КПД холодильника.

Удельная производительность барабанных холодильников составляет 2,5-3,5 т/(м<sup>3</sup> ×сут). Клинкерные барабанные холодильники имеют соотношение L/D от 10:1 до 12:1, известковые от 8:1 до 10:1.

Наличие пересыпных лопастей, способствует подъему и перемешиванию материала в холодильнике, позволяет повысить степень заполнения холодильника практически до наблюдаемой в печи.

Для достижения максимального теплообмена скорость воздуха у загрузочного конца барабанного холодильника должна составлять около 4 м/с. Потери теплоты в окружающую среду через стенки барабанного холодильника из-за излучения и конвекции составляют 250-300 кДж/кг материала.

Достоинства:

1) Простота конструкции и надежность в эксплуатации.

Недостатки:

1) Низкий КПД;

2) Необходимость увеличения высоты производственного помещения, т.к. холодильник располагается под печью.

3) Затраты электроэнергии на привод барабана.

Рекуператорные (планетарные, многобарабанные) холодильники.

Рекуператорные холодильники состоят обычно из 10-12 сварных металлических цилиндров, установленных симметрично в виде венца по окружности горячего конца вращающейся печи. Такой тип холодильников не имеет собственного привода и вращаются вместе с печью.

### Схема рекуператорного холодильника

1-корпус печи;

2- подрекуператорная обечайка;

3- лейка;

4- цилиндр-рекуператор;

5- борт;

6- разгрузочное устройство;

7- цепи;

8- башмаки;

9- роликовая опора.

Рекуператоры соединены с корпусом печи лейкой (течкой). Между лейками внутри печи установлены башмаки. Лейки и башмаки выполнены из жаропрочной стали и чугуна. Внутри рекуператоры с горячего конца оборудованы на  $\frac{1}{4}$  броневыми плитами с полками из жаростойкого чугуна для лучшего пересыпания клинкера. Для лучшего теплообмена оставшееся  $\frac{3}{4}$  длины рекуператора оборудованы навеской цепей или подъемными полками. В конце

цилиндра находится разгрузочное отверстие с колосниками, а в торце- борт, препятствующий высыпанию клинкера через открытый конец рекуператора. Через отверстия в корпусе печи клинкер поступает в планетарные холодильники. Охлаждение осуществляется в противотоке. Окружающий воздух засасывается в холодильники через торцевые отверстия со стороны разгрузочного конца под действием тяги и охлаждает пересыпающийся внутри клинкер до 250-300°С. Весь охлаждающий воздух подается в печь и идет на горение топлива. Клинкер в планетарном холодильнике обычно движется параллельно перемещению клинкера во вращающейся печи. Однако имеются планетарные холодильники, способные перемещать клинкер в противоположном направлении. Вес планетарного холодильника воспринимается роликовой опорой, расположенной перед входными патрубками для клинкера. Повышение веса корпуса печи, оборудованной планетарными холодильниками, и возникающие в корпусе напряжения ограничивают длину планетарных холодильников. По конструктивным соображениям из-за консольного расположения не разрешается превышать определенное соотношение размеров печи и холодильников. Например, для печи с производительностью 500-700 т/сутки максимальный размер планетарных холодильников составляет 1,25×7,5 метра. Этот недостаток устранен в планетарных холодильниках нового типа. Существенными отличиями новых планетарных холодильников является удлинение корпуса печи и установка дополнительной роликовой опоры для поддержки удлиненного корпуса. Это позволяет применять более крупные холодильники без снижения несущей способности корпуса вращающейся печи. Но при этом для восприятия дополнительной массы холодильника обечайка печи на этом участке должна иметь большую толщину. Отношение L/D в новых холодильниках составляет 12:1.

Планетарные холодильники имеют тепловой КПД 65-70%. Воздух прогревается до более высокой температуры, чем в барабанных холодильниках. Обычно размеры цилиндров рекуператоров составляют: длина 10-20м, диаметр- 1,65-1,95м.

Достоинства:

- 1) Просты по конструкции, надежны в эксплуатации;
- 2) Отсутствие собственного привода, что уменьшает расход электроэнергии;
- 3) Не требуется аспирационная система.

Недостатки:

- 1) Трудность регулирования объема воздуха, поступающего в печь на горение;
- 2) Усложнение работы горячего конца печи;
- 3) Возможность неравномерной загрузки барабанов и их перегрев.

При большой нагрузке или возникновении неравномерностей в эксплуатации печи клинке на выходе из планетарного холодильника может иметь повышенную температуру. В связи с этим может предусматриваться система внутреннего водяного охлаждения клинкера непосредственно перед торцами планетарных холодильников. Для снижения температуры клинкера на 25°С требуется 1% воды от массы клинкера, при необходимости в планетарные

холодильники непрерывно подается до 4% охлаждающей воды. Использование этого метода не оказывает заметного влияния на расход теплоты.

### Шахтные холодильники.

Идея охлаждения клинкера в шахтном холодильнике возникла из конструкции цементных шахтных печей, в которых имеет место комбинация из обжигового аппарата и клинкерного холодильника, которые соединены в одной установке.

### Схема шахтного холодильника.

- 1- вращающаяся печь;
- 2- головка печи и верхняя часть шахты;
- 3- шахта холодильника;
- 4- валковая решетка;
- 5- псевдооживленный слой клинкера;
- 6- выходной клапан;
- 7- охлаждающий воздух;
- 8- конвейер.

Холодильник состоит из выложенной огнеупорной шахты, валковой решетки и разгрузочного бункера с выходным воздухопроницаемым клапаном. Он оборудован вентилятором для нагнетания охлаждающего воздуха. Верхняя часть шахты имеет меньший диаметр, что позволяет повысить скорость охлаждающего воздуха на этом участке и придать около клинкера подвижность. Благодаря эффекту оживления материал в верхней части шахты переходит в псевдооживленное состояние, и клинкер, поступающий в холодильник из вращающейся печи, немедленно равномерно распределяется по всему поперечному сечению шахты. Каждый из профилированных валков валковой решетки имеет отдельный привод. При необходимости валки могут вращаться с различной частотой, обеспечивая нужную скорость подачи материала. Куски клинкера или извести крупностью более 25 мм дробятся под действием валков. Охлаждающий воздух распределяется по поперечному сечению шахты равномерно. В псевдооживленном слое материала создаются условия для наиболее интенсивного теплообмена. Однако в действительности условия псевдооживления не всегда удается реализовать полностью, т.к. постоянство размеров гранул материала, его количество и равномерное распределение воздуха не всегда достижимы.

Поскольку охлаждение в шахтном холодильнике происходит быстро, качество клинкера почти не отличается от клинкера, охлажденного в колосниковом холодильнике.

В зависимости от расхода охлаждающего воздуха температура клинкера на выходе из холодильника составляет 250-280°C. Температура вторичного воздуха, идущего на горение после процесса охлаждения, составляет 900-1000°C. Расход охлаждающего воздуха составляет 1,1 м<sup>3</sup>/кг клинкера, удельные энергозатраты – около 8 кВт×ч/т клинкера. Тепловой КПД шахтного холодильника равен 75-80%. Поскольку шахтный холодильник не имеет избыточного воздуха, отпадает необходимость в аспирационной системе.

### Колосниковые холодильники

Существует несколько конструкций колосниковых холодильников: скребковый, переталкивающий, вибрационный, цепной, вращающийся и др. Все они работают по одному принципу – охлаждение материала осуществляется просасыванием воздуха через его слой. Используются для охлаждения извести и клинкера. Для печей высокой производительности применяются в основном колосниково-переталкивающие холодильники, производительность которых может достигать более 200т/час. Промышленностью СНГ выпускаются колосниково-переталкивающие холодильники серий “Волга” и СМЦ-33. Холодильники серии “Волга” выпускаются для печных агрегатов производительностью 25, 35, 50, 70, 125 и 150 т/ч, серии СМЦ-33 – для агрегатов производительностью 125 т/ч. Все они аналогичны по принципу действия, имеют унифицированные узлы и детали и отличаются в основном размерами и конструкцией отдельных элементов.

Принцип работы колосникового холодильника следующий. Раскаленный клинкер с температурой 1200 – 1250°C ссыпается из вращающейся печи в приемную шахту холодильника, где образуется насыпной отвал, по которому слой клинкера сползает на колосники острого дутья. Здесь клинкер подвергается резкому охлаждению воздухом, продуваемом вентилятором через колосники под давлением 10 – 12кПа. Далее клинкер равномерно распределяется на колосниковой решетке слоем 150 – 200мм. Решетка заключена в металлический герметизированный кожух, верхняя часть которого футерована шамотным огнеупором. Колосниковая решетка состоит из рядов подвижных и неподвижных колосников. Подвижные закреплены на подвижных подколосниковых балках, которые совершают возвратно-поступательное движение. Число движений составляет 6 – 18 в минуту, величина хода составляет 150мм. Колосники имеют крутую переднюю рабочую поверхность и отлогую заднюю. За счет этого в результате их возвратно-поступательного движения клинкер перемещается и перемешивается на решетке, двигаясь к разгрузочному концу. В процессе движения мелкие куски клинкера проваливаются в подрешеточное пространство и скребковым конвейером направляются в разгрузочную часть охладителя.

Подрешеточное пространство разделено на две камеры – горячую и холодную. Воздух вентилятором общего дутья под давлением 1,6 – 2,5кПа подается в обе камеры и продувается через щели колосников и слой материала. Воздух, поступающий из горячей камеры, имеет температуру 550 – 600°C и направляется в печь в качестве вторичного воздуха на горение топлива. Из холодной камеры



воздух с температурой около 120°С через очистные устройства выбрасывается в атмосферу или частично утилизируется. Чтобы уменьшить количество избыточного воздуха и повысить температуру вторичного воздуха, применяют двухкратное его просасывание через слой клинкера. Температура подогрева воздуха при этом в горячей камере достигает 800°С.

В разгрузочном конце холодильника установлены неподвижный грохот и молотковая дробилка для измельчения крупных кусков клинкера. Падающий клинкер затем пластинчатым конвейером направляется на склад. Материал охлаждается в колосниковом холодильнике до 40 – 50°С.

При постоянном количестве охлаждающего воздуха, подаваемого вентиляторами, степень охлаждения клинкера зависит от скорости его перемешивания и толщины слоя на решетке. Регулируя эти два параметра и сочетая их с работой печи, можно достигнуть оптимальных условий охлаждения клинкера. Тепловой КПД колосниковых холодильников достигает 75 – 85%.

#### Достоинства:

- 1) Высокий тепловой КПД за счет интенсивного теплообмена между воздухом и клинкером и высокой степени охлаждения.
- 2) Большая производительность за счет высокой скорости охлаждения.

#### Недостатки:

- 1) Образование избыточного нагретого воздуха, значительную часть которого (60 – 70%) необходимо либо утилизировать, либо выбрасывать в атмосферу, снижая этим КПД агрегата и усложняя систему пылеочистки.
- 2) Недостаточная герметичность холодной и горячей камер.
- 3) Ненадежность работы привода горячей секции колосниковой решетки.

Несмотря на указанные недостатки, колосниковые холодильники являются самыми современными и эффективными.

### Печи скоростного обжига

Печи скоростного обжига отличаются высокой удельной производительностью, уровнем тепловой форсировки (кВт/м<sup>2</sup>), лучшим качеством продукции, лучшими условиями теплообмена. Они обеспечивают экономию капиталовложений, эксплуатационных расходов, повышают производительность труда за счет интенсификации обжигового процесса, когда его продолжительность исчисляется не часами, как в шахтных и вращающихся печах, а минутами и секундами. Такие печи используются пока для обжига извести и разделяются на следующие типы:

- 1) В кипящем и фонтанирующем слое;
- 2) Во взвешенном состоянии в закрученных и незакрученных потоках. К ним относятся также циклонно-вихревые печи.

Указанные конструкции печей скоростного обжига находятся в стадии промышленного освоения. Общим недостатком этих печей является большой пылеунос (до 25% в печах кипящего слоя, в остальных – 100%), что определяет необходимость установки мощной аспирационной системы и дополнительных затрат электроэнергии.

### Основные направления повышения эффективности печных агрегатов

Эффективность печных агрегатов характеризуется:

- 1) Удельными капитальными затратами;
- 2) Затратами на превращение исходных сырьевых материалов в целевые продукты;
- 3) Трудозатратами.

Снижение затрат на передел исходных материалов является задачей технологов и может быть достигнуто:

- 1) Экономией энергоресурсов при осуществлении термотехнологических процессов;
- 2) Совершенствованием термотехнологических процессов для повышения качества продукта, повышением теплоты физических и химических превращений в исходном сырье;
- 3) Увеличением срока эксплуатации печей за счет качественного выполнения футеровочных и монтажных работ;
- 4) Укрупнением печей.

Экономия энергоресурсов может быть достигнута за счет создания оптимальных условий теплообмена, снижения потерь теплоты, полного использования вторичных печных энергоресурсов (ВЭР). ВЭР (теплота отходящих газов, воздуха) должна использоваться для нагрева воды, воздуха, сушки исходных сырьевых материалов, получения пара и т.д. Для этих целей применяются рекуператоры, регенераторы, котлы-утилизаторы и др. теплообменные устройства.

#### Теплотехнические испытания печей и аппаратов

Проводятся с целью установления фактических показателей работы печей и выработки мероприятий по их улучшению.

Испытания проводят через определенный промежуток времени в течение 72 часов. Записывают показатели для составления теплового баланса и выявления и исправления недостатков.

Проводится не менее двух теплотехнических испытаний каждой печи или аппарата.

В содержание теплотехнических испытаний тепловых агрегатов входит измерение следующих показателей:

- 1) По топливу;
- 2) Исходному сырью;
- 3) Готовому продукту;
- 4) Пылеуносу;
- 5) Воздуху;
- 6) Дымовым газам;
- 7) Работе агрегата в целом;
- 8) Дополнительные измерения.

Показатели по топливу: расход, температура, удельная теплота сгорания, влажность, зольность, состав органической части, содержание летучих примесей (для угля), тонина помола (для угля).

Показатели по исходному сырью: расход, влажность, химический состав, содержание  $\text{CaCO}_3$  или  $\text{CO}_2$ , температура, тонина помола или зерновой состав, средняя плотность (для шлама), объемная масса (для сыпучих материалов).

Показатели по готовому продукту: выход, температура на выходе из печи, температура на выходе из холодильника, средняя плотность, химический состав, структура.

Показатели по пылеуносу: общий пылеунос, возврат уловленной пыли, выброс пылеуноса в атмосферу, влажность возвращаемого в агрегат пылеуноса, температура возвращаемого пылеуноса, зерновой состав общего и возвращаемого пылеуноса, выход пылеуноса после холодильника до пылеулавливания, выброс пылеуноса из холодильника после пылеулавливания, зерновой состав общего пылеуноса из холодильника и уловленного пылеуноса.

Показатели для воздуха:

- 1) Расход и давление первичного воздуха, нагнетаемого в печь;
- 2) Расход избыточного воздуха, нагнетаемого в холодильник;
- 3) Расход избыточного воздуха, выбрасываемого из холодильника в атмосферу и разрежение за пылеуловителем;
- 4) Температура окружающего воздуха;
- 5) Температура избыточного воздуха на выходе из холодильника;
- 6) Температура воздуха под и над решеткой холодильника в его горячей и холодной камерах.
- 7) Температура воздуха и его разрежение в канале, соединяющем холодильник с печью;
- 8) Разрежение над решеткой холодильника в нескольких точках по длине решетки.

Показатели по дымовым газам:

- 1) Состав перед пылеулавливанием;
- 2) Состав после пылеулавливания;
- 3) Температура газов, выходящих из печи;
- 4) Температура газов перед дымососом;
- 5) Расход газов перед дымососом (производительность дымососа);
- 6) Разрежение в головке печи;
- 7) Температура в топочном пространстве печи;
- 8) Разрежение за печью;
- 9) Разрежение в дымовом канале перед дымососом.

Для печи в целом определяется: продолжительность работы на полном, среднем и тихом ходу, простой печи, общая продолжительность испытания.

В дополнительные измерения входят показатели, обусловленные наличием запечных теплоутилизаторов, применением пылеугольного топлива, получаемого в шаровой мельнице, расход электроэнергии по всем электродвигателям.

Периодичность измерений может быть через 0,5, 1, 2 ч для разных показателей.

Испытания позволяют установить существующие характеристики оборудования.

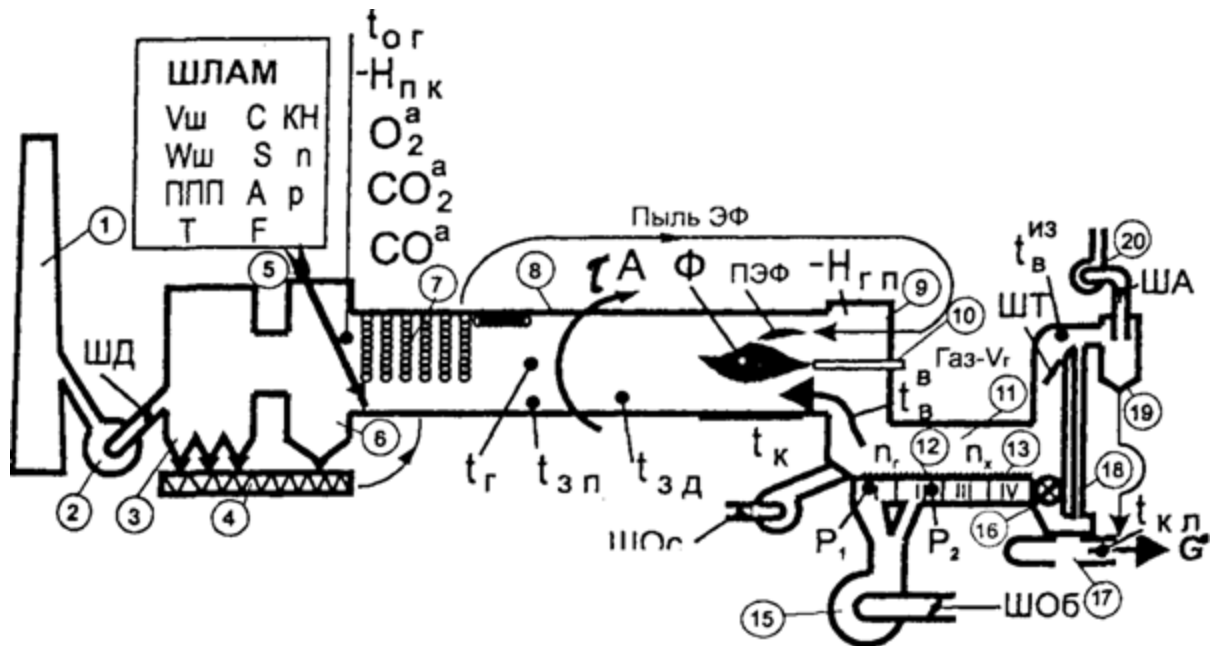
По составленному тепловому балансу выясняются соотношения статей расхода тепла, недостатки работы оборудования. Проводятся мероприятия по ликвидации недостатков. После их устранения проводят повторные испытания. Полученные показатели принимаются как нормативные.

Как уже упоминалось ранее, наиболее эффективными установками для обжига глиноземистого клинкера по мокрому способу являются вращающиеся печи, представляющие собой стальной барабан, футерованный внутри огнеупорным кирпичом. Эту печь принимаем в качестве основного аппарата для обжига клинкера. Печь оборудуется внутри печными керамическими и металлическими теплообменниками, в качестве топлива используем газ.

Далее рассмотрим некоторые аспекты управления обжигом клинкера в печи.

Особенностью работы вращающейся печи является то, что в одном агрегате одновременно протекают взаимообусловленные химические и физические превращения вещества, термохимические, теплообменные, газодинамические процессы, осуществляется факельное сжигание топлива, происходит перенос возогнанных и конденсированных фаз из материального потока в газовый и обратно. Каждый из приведенных отдельных процессов сам по себе достаточно сложен. При управлении же всей системой в целом возникают дополнительные трудности, обусловленные взаимным влиянием указанных процессов, накладывающихся друг на друга. Так, разложение  $\text{CaCO}_3$  с выделением  $\text{CO}$ , частично происходит в пламенном пространстве и действует на горение топлива как углекислотный огнетушитель, изменяя форму факела, что в свою очередь влияет на процесс декарбонизации  $\text{CaCO}_3$ . Или другой пример при возникновении клинкерной пыли снижаются КПД холодильника и теплосодержание вторичного воздуха, что обуславливает удаление факела от горячего обреза печи и приводит к еще более интенсивному клинкерному пылению. Приведенные примеры свидетельствуют о принципиальной особенности вращающейся печи, которая заключается в том, что при ее эксплуатации невозможно обособленно воздействовать на какой-либо один процесс или параметр, не затрагивая всю систему в целом.

Процесс обжига клинкера во вращающихся печах за 100-летний период их эксплуатации изучен многими исследователями. При этом работы в основном разделяются на два относительно обособленных и самостоятельных направления: исследование физико-химических процессов клинкерообразования со значительным химическим уклоном и изучение теплотехнических закономерностей во вращающихся печах. Учитывая, что печь является одновременно химическим и тепловым агрегатом, при эксплуатации необходимо учитывать эту особенность /4/.



- |                              |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1 - дымовая труба,           | 11 - колосниковый холодильник, |
| 2 - дымосос,                 | 12 - горячая решетка           |
| 3 - электрофильтр,           | 13 - холодная решетка,         |
| 4 - система пылевозврата,    | 14 - вентилятор острого дутья  |
| 5 - шламовая труба,          | 15 - вентилятор общего дутья,  |
| 6 - пылеуловительная камера, | 16 - дробилка,                 |
| 7 - цепная завеса,           | 17 - транспортер               |
| 8 - вращающаяся печь,        | 18 - труба аспирации течек     |
| 9 - головка печи,            | 19 - осадительный циклон,      |
| 10 - горелка,                | 20 - аспирационный вентилятор  |

#### Характеристика материалов

Шлам  $V_{ш}$  [ $m^3/ч$ ] - расход,  $W_{ш}$  [%] - влажность ППП [%] - потери при прокаливании  $T$  [%] - титр,  $C, S, A, F, КН, п, р$  - соответствуют общепринятым обозначениям, пыль электрофильтров - ПЭФ, выработка клинкера -  $v_{кл}$  [ $t/ч$ ]

Контрольно-измерительные параметры  $t_{or}, t_r^u, t_{3n}, t_{3fl}, t_k, t_v^B, t_8^M, y^oC$  - температуры газов отходящих и на входе в цепи, материала в зонах подогрева и декарбонизации корпуса печи вторичного и избыточного воздуха клинкера,  $O_2^a, CO_2^a, CO^a$  [%] - состав отходящих газов по анализу,  $(-H_{пк}), (-H_{гп})$  [ $кг/м^2$ ] - разрежение в пыльной камере и головке печи,  $A$  - нагрузка на приводе печи,  $P_1, P_2$  [ $кг/м^2$ ] - давление в I и II камерах холодильника

Рычаги управления ШД, ШОс, ШОб, ШТ ША - шибера дымососа, вентиляторов острого и общего дутья технологический и аспирации,  $V_r$  [ $m^3/ч$ ] - расход газа,  $t$  [с] - время одного оборота печи  $n, n_x$  (мин ') - число колебаний горячей и холодной решеток холодильника в минуту.

Современные вращающиеся печи мокрого способа производства, как правило, частично или полностью оснащены приведенным на рис. 2.1 комплексом контрольно-измерительных приборов (КИП) и необходимыми рычагами управления. Основной задачей является обеспечение необходимого заданного нагрева материала по длине печи, который определяется составом сырья и в большей мере теплотехническими режимными параметрами работы агрегата.

Таким образом, из приведенного анализа следует первое важнейшее правило - печь необходимо «готовить» с холодного конца. «Подготовка» материала в зоне сушки в основном контролируется по двум параметрам: температуре отходящих газов  $t_0^{\wedge}$  и дополнительно - по температуре материала в зоне подогрева  $t_{ин}$ .

Многочисленные испытания и наблюдения за работой печи показали, что при изменении  $t_0^{\wedge}$  на  $10^{\circ}\text{C}$  -  $t_m$  изменяется на  $50 - 70^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, при оптимально «налаженной» работе печи с предельно-минимальным расходом топлива колебания температуры отходящих газов не должны выходить за пределы  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ . Возможность работы печи с большими колебаниями температуры отходящих газов без «тихих ходов» свидетельствует о работе печи с некоторым избытком топлива.

Наравне с температурой отходящих газов важнейшим показателем «подготовки» материала в зоне сушки является разрежение за обрезом печи -  $H_{пк}$ . Эти параметры взаимозависимы - самопроизвольное увеличение  $H_{пк}$  без открытия шиберов дымососа свидетельствует о возрастании газодинамического сопротивления печи, связанного с увеличением вязкого шлама на цепях, что приводит к снижению и, наоборот, самопроизвольное возрастание  $\rho_{глл}$  связано с уменьшением вязкого шлама на цепях и обуславливает снижение  $H_{пк}$ .

Следующие параметры по ходу материала, которые необходимо поддерживать в заданных пределах ( $\pm 10-15^{\circ}\text{C}$ ), - это температура материала в зонах подогрева  $t_{3н}$  и декарбонизации  $t_{3д}$ . Постоянство этих параметров в первую очередь обеспечивается изменением расхода топлива и иногда незначительным изменением «тяги» в печи. В критической ситуации, не дожидаясь подхода неподготовленного материала к зоне спекания, целесообразно заблаговременно переводить печь на «средний ход».

Рассмотрим далее способы регулирования состояния материала в зоне спекания с обеспечением высокого качества клинкера. В настоящее время при определенных возможностях КИП основная оценка состояния зоны спекания производится визуально через защитное цветное стекло. При этом оценка производится по следующим показателям: машинист просматривает подход неподготовленного материала из зоны декарбонизации с температурой около  $900^{\circ}\text{C}$ , который на фоне разогретого клинкера кажется абсолютно черным, когда «сырой черный» материал слишком близко подошел к зоне спекания из-за короткого напряженного факела. В этих условиях, чтобы качественно обжечь клинкер, необходимо повысить температуру в зоне спекания, вследствие чего увеличивается количество расплава и, следовательно, подъем клинкера. В тех случаях, когда просматривается «черный» горизонтально расположенный материал, свидетельствующий о бурном выделении  $\text{CO}_2^L$  из сырья и отсутствии жидкой фазы, печь следует переводить на «тихий ход».

Положение зоны декарбонизации можно также определять по цвету обмазки. При рациональном режиме обмазка постепенно изменяет цвет от темно-серого до светло-желтого; при нерациональном - наблюдается резкая граница < между «черной» и «перегретой» обмазкой.

Окончательно качество обжига клинкера оценивают по его гранулометрии на выходе из зоны спекания, которая должна быть равномерной и находиться в пределах 10-20 мм. Такой относительно монофракционный состав, как экспериментально установлено на специальной модельной установке И.П.

Борисовым, обеспечивает создание в зоне спекания устойчивой защитной обмазки. Разброс фракционного состава клинкера, когда одновременно с мелкими частицами и пылью образуется крупный клинкерный «свар» размером до 60-80 мм, свидетельствует о короткой перегретой зоне спекания и близко расположенной зоне декарбонизации, когда факел «работает в упор».

Как отмечалось ранее, важнейшими наиболее энергоемкими зонами являются зоны сушки и декарбонизации, подготовка материала в которых определяет стабильность работы печи. Способ контроля зоны сушки представлен ранее, поэтому необходимо рассмотреть возможность инструментальной оценки степени подготовки материала в зоне декарбонизации. Эту величину абсолютно гарантированно можно определять по составу отходящих газов и разрежению в головке печи. Суть этих зависимостей заключается в следующем. При увеличении количества неподготовленного материала в зоне декарбонизации возрастает объем  $\text{CO}_2$  из сырья, следовательно, и в отходящих газах. Учитывая, что объем газов, отсасываемых дымососом, остается постоянным, то избыток  $\text{CO}_2$  приводит к пропорциональному уменьшению «засасываемого» из холодильника вторичного воздуха и, следовательно, к снижению содержания  $\text{O}_2$  в отходящих газах и разрежения в головке печи (-П, п) /4/.

Поэтому в организации технологического контроля особое внимание должно быть уделено автоматизации пробоотбора.

Масса пробы должна быть достаточной для сохранения в пробе анализируемых качеств материала. Минимальная масса контрольной пробы рассчитывается по специальным методикам или определяется соответствующими стандартами.

Система контроля должна соответствовать требованиям "Инструкции по организации контроля производства цемента".

#### Контроль и управление режимом работы

*Оснащение контрольно-измерительными приборами.* Для контроля и управления режимом работы печей должны быть установлены "контрольно-измерительные приборы и определены нормативы основных параметров. Каждая вращающаяся печь должна быть оснащена приборами для контроля: температуры газов в зоне спекания (факела горения), за печью, перед теплообменниками (встроенными и запечными), У дымососов, перед и после электрофильтров, первичного и вторичного воздуха, материала в зоне кальцинирования и после теплообменных устройств, клинкера после холодильников, топлива перед горелками; разрежения в головке печи, за печью, , перед дымососами, перед и после электрофильтров; давления газообразного топлива перед горелками, первичного воздуха; полноты горения топлива ( $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CR}$ ); степени открытия дросселей, шиберов, направляющих аппаратов дымососов и вентиляторов и других управляющих органов; частоты вращения печи, питателей сырья, возврата уловленной пыли и др.; расхода первичного и вторичного воздуха. Кроме того, печи должны быть оснащены аппаратурой и приборами для организации учета.

Установленные контрольно-измерительные приборы должны обеспечить необходимую точность измерения технологических параметров. Для этого необходимо исключить или уменьшить воздействие факторов, являющихся

источниками погрешности приборов. Так, при измерении температуры газов источником погрешности может быть лучистый теплообмен. В этом случае необходимо рабочие концы термопар защищать экранами в виде трубок из легированных сталей или керамических материалов. Необходимо устранять также возможность искажения замеров подсосами холодного воздуха. Для более точного измерения необходимо использовать отсасывающие термопары. Это относится, например, к измерению температуры воздуха, поступающего из колосникового холодильника в печь.

Особое внимание следует обратить на выбор точек установки измерительных приборов. Так, установку термопар нужно производить в местах с хорошо перемешанными потоками газов: после дымососов и местных сопротивлений (арматуры, поворотов и др.) > на прямых участках, имеющих длину не менее трех-четырех диаметров. При смешивании двух потоков установку термопары следует производить на расстоянии не менее 10—15 диаметров после места объединения потоков.

Во всех других случаях точки установки рабочей термопары необходимо выбирать на основании определения поля температур (определяется так же, как поле скоростей). Если температура потока в любой точке сечения отличается более чем на  $\pm 5\%$  от среднего арифметического ее значения в этом сечении, то одновременно с измерением температуры по сечению газоходов необходимо измерить местные скорости потока и определить среднюю динамическую температуру газового потока по формуле:

Измеряемая контрольной термопарой, расположенной по оси газохода, температура не должна отличаться от рассчитанной средней динамической более чем на 10%. При более значительном расхождении следует по возможности выбрать другое сечение.

Для измерения температуры поверхностными термопарами (например, температуры колосников и балок переталкивающих холодильников) необходимо устранить возможность искажения показаний горячей просыпью клинкера и вдуваемым холодным воздухом. Для этого рабочие концы термопар плотно заделывают в тело колосников (балок) или в приваренные бобышки, а места зачеканки и отходящие от них провода изолируют.

При измерении статического давления потока газа (воздуха) важно тщательно производить отбор давления, так как возможны значительные погрешности в результате влияния, оказываемого динамическим давлением (скоростным напором) потока, особенно при скорости выше 8—10 м/с. Основные требования по устройству отбора — гладкие внутренние поверхности труб, закругление краев отверстий.

В местах значительных возмущений потоков (при выходе из сепараторов) замер статического давления происходит с большими погрешностями, поэтому перед местом измерения необходимо устанавливать специальные струевыпрямители или для получения усредненных данных измерение давления следует производить не менее чем в четырех точках.

*Контролируемые показатели и нормативы.* Для каждой печи должны быть установлены основные показатели и нормативы. Контролируемые показатели технологического и теплотехнического режима работы печей определяются



технологическим регламентом процесса обжига клинкера, разрабатываемым в соответствии с требованиями "Правил эксплуатации оборудования и ведения • производственного процесса на предприятиях цементной промышленности".

Технологические нормы устанавливаются на основании теплотехнических испытаний вращающихся печей. Для печей, вводимых в эксплуатацию после монтажа, разрабатываются временные нормативы на основании расчетных проектных и паспортных показателей. В процессе проведения наладочных работ и испытаний параметры и технологические нормативы уточняются и на заключительном этапе разрабатывается технологический регламент процесса с постоянными нормативами.

*Система регулирования процесса обжига.* Система регулирования процесса обжига должна обеспечивать стабилизацию расхода сырьевой смеси, топлива и воздуха (стабилизация качества сырьевой смеси и топлива выходит за пределы регулирования процесса обжига клинкера).

Изменение расхода сырьевой смеси оказывает влияние на характер процесса только спустя некоторое время, необходимое для прохождения материала через печь (0,5—2 ч). Значительно быстрее влияет изменение частоты вращения печи.

Однако при такой системе регулирования меняется производительность печи. Поэтому рекомендуется и наиболее часто практически используется регулирование расхода топлива, и воздуха при постоянных расходе сырьевой смеси и частоте вращения. Если же регулированием расхода топлива и воздуха не удастся нормализовать процесс обжига и параметры работы печи, то применяется регулирование частоты вращения: снижаются обороты печи и расход сырья на короткий период до нормализации режима.

Система подачи шлама должна обеспечивать стабильную подачу заданного количества материала. При этом обязательно пропорциональное изменение расхода сырьевой смеси с изменением частоты вращения для обеспечения постоянного заполнения печи материалами. Для этого используются автоматические регуляторы, обеспечивающие синхронность частоты вращения нечи и питателей.

Для подачи шлама должны использоваться объемные питатели с плавной регулировкой расхода и автоматическими устройствами типа КШ-3, или автоматические реактивные питатели и индукционные расходомеры. Относительная погрешность при питании вращающихся печей сырьевой смесью не должна превышать 2-2,5%.

Система управления процессом сжигания топлива должна обеспечивать возможность плавного регулирования его подачи в заданном количестве, изменения положения топливной горелки по длине печи и по отношению к обжигаемому материалу, контроля количества подаваемого топлива и воздуха, полноты горения.

Серьезное внимание должно быть уделено состоянию регулирующих устройств. Практика работы предприятий и проведения наладочных работ показывает, что регулирующие заслонки, жалюзи, шиберы, дроссели, рычажные механизмы к ним и другие узлы систем регулирования очень часто конструктивно выполнены неудовлетворительно. Нередки случаи, когда исполнительные механизмы неправильно смонтированы или отрегулированы, отсутствуют фиксаторы, ограничители или указатели положения регулирующих органов и для проверки требуется демонтаж или вырезка "окон".

При проведении наладочных работ все регулировочные устройства необходимо проверить и тщательным образом отрегулировать. Все узлы устройств должны быть изготовлены качественно в соответствии с техническими требованиями, регулирующие заслонки прочно закреплены на осях, исполнительные механизмы и конечные выключатели установлены в соответствии с положением заслонок в диапазоне регулирования, показания щитовых приборов должны соответствовать фактическому положению регулирующих органов.

Для контроля состояния и положения регулирующих органов должны быть предусмотрены указатели положения и специальные смотровые лючки.

### Эксплуатация вращающихся печей и ТБ при работе с ними

Эксплуатация вращающихся печей должна соответствовать установленным правилам. Перед тем, как разжечь печь, необходимо прикрыть дымовой шибер и убедиться в исправности всего вспомогательного оборудования и КИП путем его апробирования. При работе на газе нужно проверить газоплотность системы, продуть газопровод и прорегулировать печь. Печи, работающие на мазуте и пылеугольном топливе, разжигают с помощью костра из дров, заранее уложенных в виде клетки в топочном пространстве на расстоянии около 5 м от устья форсунки или горелки. Для розжига печи на газе вместо дровяного костра применяют запальное устройство. После горения топливного факела в течение 20 – 30 мин требуется осмотреть близлежащие от факела участки футеровки. Если они разогрелись до слабокрасного свечения, нужно приоткрыть дымовой шибер и пустить барабан печи от вспомогательного привода с частотой вращения, равной 1об/час. При нагреве футеровки до ярко-красного свечения барабан переводят со вспомогательного на главный привод, а печь разогревают еще около 3 ч, постепенно поднимая температуру газов до заданного уровня. Затем, остановив подачу топлива и первичного воздуха, нужно через специально предназначенное отверстие тщательно осмотреть разогрев футеровки по всей длине барабана. Убедившись в достаточном разогреве и исправности футеровки, печь пускают в работу с одновременной загрузкой ее сырьем, количество которого составляет около 70% от нормы. В течение 2 суток загрузку сырьем доводят до нормы. В процессе работы печи должна поддерживаться постоянная загрузка ее сырьем и топливом для обеспечения стабильного температурного режима.

Температурные колебания отходящих газов должны быть не более  $\pm 25^{\circ}\text{C}$  по отношению к норме. Содержание в них компонентов недожога ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ) не должно превышать 0,2%, содержание  $\text{O}_2$  может колебаться в пределах  $\pm 0,5\%$  от нормы, разрежение газов в головке печи должно составлять не менее 30 Па. Перевод печи на тихий ход допускается лишь в крайнем случае, когда регулирование подачи топлива и воздуха не дает необходимого эффекта. Работа печи с отклоненными или неисправными пылеуловителями не допускается.

При обслуживании вращающихся печей, работающих на угольной пыли, устраняются места возможного скопления пыли, поддерживается хорошее состояние тепловой изоляции пылепроводов, регулируется процесс горения для устранения выноса искр в пылеосадительную камеру. Запрещается работать при прогарах футеровки, при стреле прогиба больше 2,5% диаметра и если бандаж печи не прилегает к роликам на какой-либо части оборота. При наличии хотя-бы 10%

ослабленных заклепок печь выводится в ремонт. Все механизмы печи должны быть закрыты. При эксплуатации электрофильтров соблюдаются правила эксплуатации электрических устройств.

#### Эксплуатация шахтных печей и ТБ при работе с ними

Перед тем, как разжечь печь, необходимо прикрыть дымовой шибер перед дымососом, опробовать его вспомогательное оборудование и КИП, чтобы убедиться в их исправности. При розжиге печи на твердом топливе с помощью загрузочного устройства шахта печи на 2/3 высоты заполняются балластом (отсортированным щебнем). Затем включают разгрузочное устройство, дутьевой вентилятор или воздуходувку и проверяют их исправность под нагрузкой. Через смотровые окна проверяют также равномерность распределения потока воздуха в поперечном сечении шахты. Затем шахта равномерно загружается на слой балласта короткомерные сухие дрова. На них бросаются через люки горящие мелкоколотые дрова в виде связок таким образом, чтобы все дрова по сечению загорелись.

Затем на протяжении 2 часов в шахту периодически подбрасывают дрова, чтобы поддержать интенсивное горение костра для нагрева футеровки. Через 2 часа, когда дрова осядут плотным слоем, на них засыпают 150 – 200 кг антрацита или кокса мелкими порциями, чтобы он быстрее разгорелся по всей поверхности слоя. Убедившись в хорошем горении топлива, начинают пополнять печь рабочей топливно-сырьевой шихтой, увеличивая постепенно дутье и тягу. При работе на газе его начинают подавать в печь на разогретый костер из дров.

При выводе печи на работающий режим следует руководствоваться не визуальными наблюдениями через смотровые окна, а показателями КИП. Продолжительность розжига шахтной печи с момента загорания дров до начала рабочего режима составляет 16 – 24 ч.

Эффективность работы шахтных печей достигается при ее загрузке однородной по размерам массой известняка. Температуру отходящих газов необходимо поддерживать в установленных пределах. Она понижается при недостаточной подаче воздуха или избыточной загрузке сырья, а повышается – при опускании уровня загрузки сырья ниже установленного или избыточной подаче топлива. Зона горения топлива должна находиться на заданном уровне по высоте шахты. Изменение уровня достигается регулировкой разгрузочного устройства печи: при увеличении разгрузки зона горения опускается, при уменьшении – поднимается. Если требуется повысить разогрев материала в печи, нужно увеличить подачу топлива и воздуха, не допуская “сваров” в зоне горения топлива. Необходимо следить за полнотой загрузки печи, не допуская снижения уровня материала и обнажения уровня футеровки печи. Если печи работают под давлением, то перед открыванием смотровых люков во избежание ожогов надо уменьшить дутье, следить за плотностью затворов загрузочных и разгрузочных механизмов. При работе печи на газообразном топливе необходимо соблюдать правила, разработанные для газостанций.