

Тема 2. Конструкции и тепловая работа печей

Лекция 7

§ 9. Садочные термические печи

Термическую обработку производят с целью повышения твердости, улучшения обрабатываемости и достижения большей однородности металла.

Виды термообработки: закалка (нагрев и последующее быстрое охлаждение с целью фиксации высокотемпературного состояния), нормализация и отжиг (оба термина относятся к нагреву, выдержке при определенной температуре и последующему медленному охлаждению, но при нормализации нагрев производят до более высокой температуры).

Основным требованием к термическим печам является возможность точного регулирования температуры и создание условий для равномерного нагрева металла по всему сечению садки.



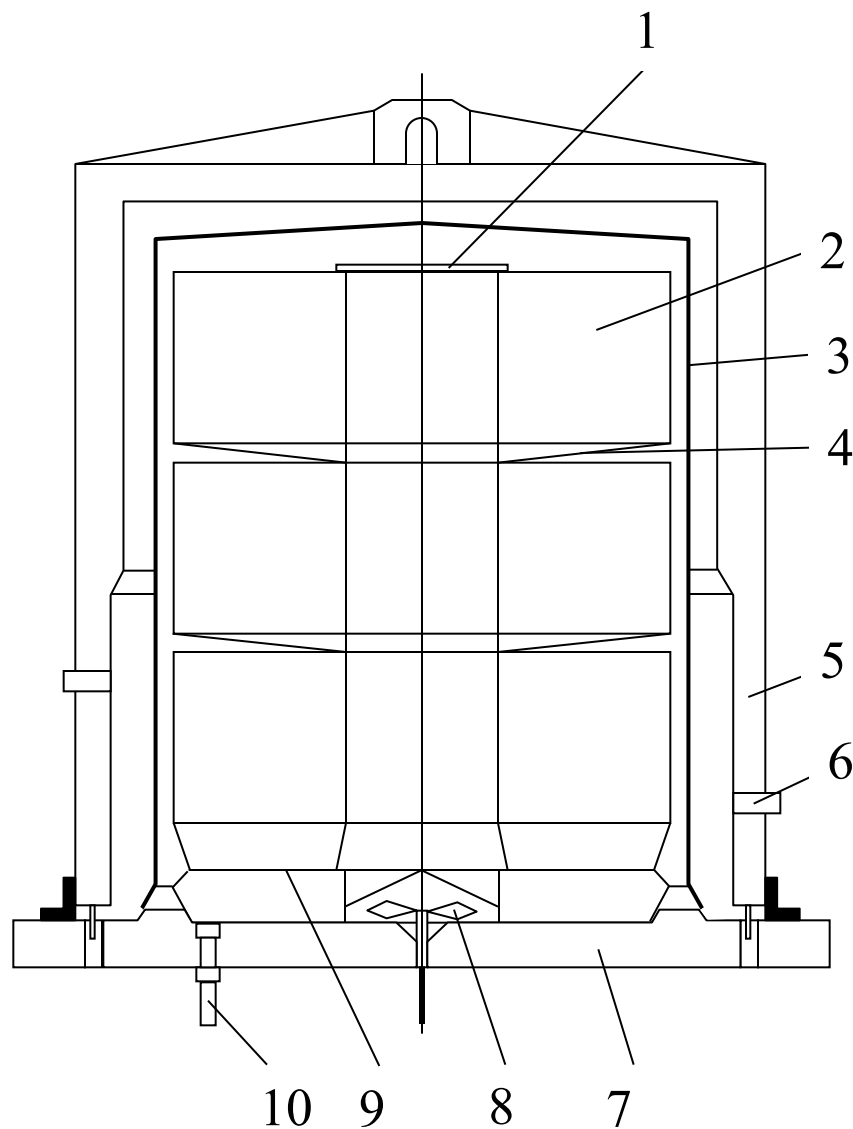
Прокатное производство предприятия «АрселорМиттал Темиртау». Слябы раскатываются в стальную ленту толщиной до 0,5 мм. Так из 9-метровой заготовки получается около км готового проката для дальнейшей обработки металла и получения конечной продукции

При термической обработке прокатанной стали применяют печи 2 типов: садочные и проходные.

В связи со сравнительно небольшими объемами производства цветных металлов, их термообработку осуществляют в садочных печах. Это периодически действующие агрегаты с переменной во времени температурой. Загрузка металла обычно осуществляется в полуостывшую печь, в процессе нагрева он находится в неподвижном состоянии, и нагрев металла происходит вместе с нагревом печи.

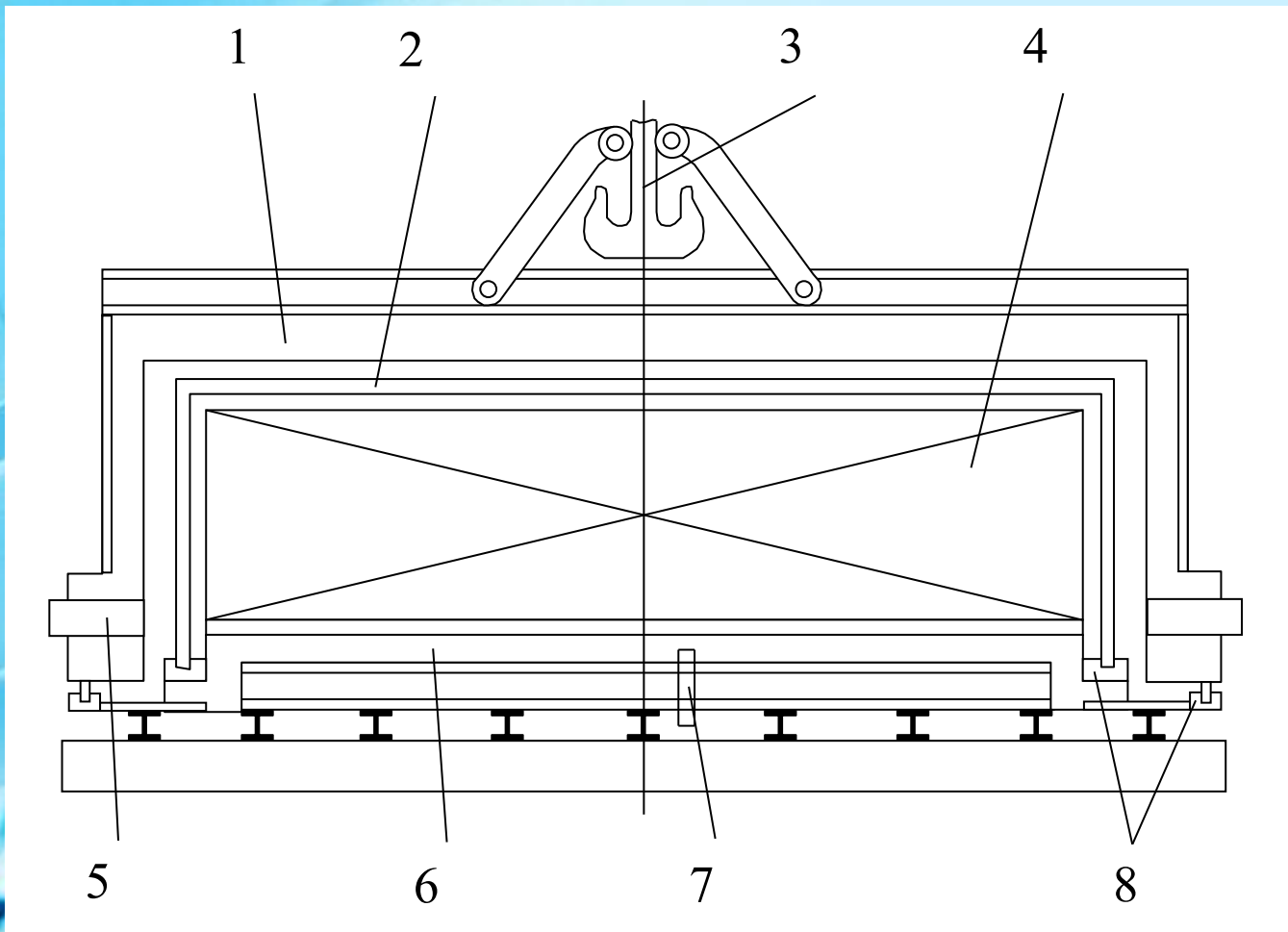
И в черной и в цветной металлургии нашли применение печи, в которых нагрев садки на стационарном поду (стенде) осуществляется под переносной футеровкой, называемой нагревательным колпаком.

Колпаковые печи классифицируют по назначению - для обработки рулонов ленты, листов, прутков и другие.



Одностопная
колпаковая печь
для отжига
распушённых
рулонов:

- 1 - крышка;
- 2 - распушённый рулон;
- 3 - защитный муфель;
- 4 - конвекторные кольца;
- 5 - нагревательный колпак;
- 6 - горелки;
- 7 - стенд;
- 8 - вентилятор;
- 9 - направляющий аппарат;
- 10 - трубопровод для защитного газа



Колпаковая печь для светлого отжига листов:

1 - колпак; 2 - муфель; 3 - устройство для транспортировки колпака; 4 - садка в виде стопы листов; 5 - горелки; 6 - стенд; 7 - трубка для подачи защитной атмосферы; 8 - песочные затворы

Печи для отжига рулонов могут быть одно- и многостопными. В многостопных печах на прямоугольный стенд под колпаком устанавливают несколько стоп рулонов. Каждая стопа состоит из 3-5 рулонов, имеет собственный муфель (замкнутую камеру вокруг металла). В многостопных печах рулоны прогреваются менее равномерно, но в экономическом отношении такие печи эффективнее.



Вертикальные колпаковые печи компании Yate, КНР

Колпаковые печи отапливаются с помощью инъекционных горелок топливом, сжигаемым в пространстве между керамическим колпаком и металлическим муфелем.

Газ и инжектирующийся воздух подаются через гибкие шланги. Перед каждой горелкой устанавливают карборундовую пластину, предохраняющую муфель от местного перегрева.

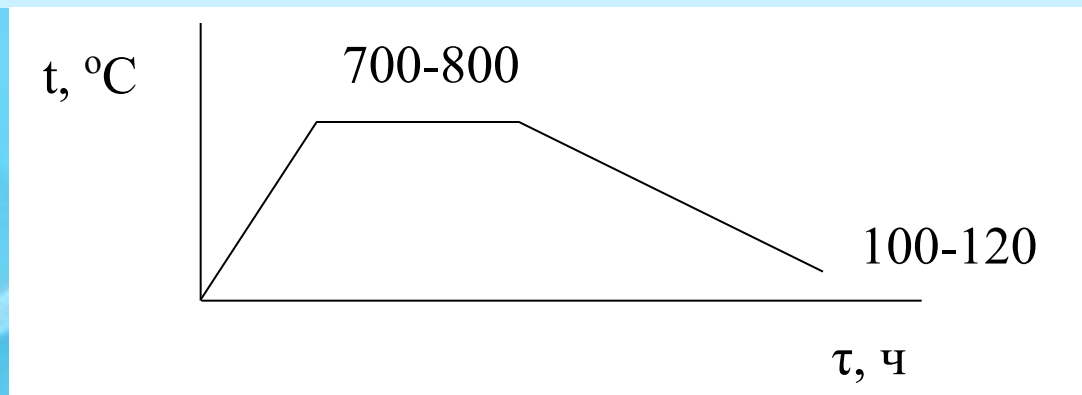
Обрабатываемый металл муфелируют (ограждают), чтобы он не взаимодействовал с продуктами сгорания; продукты сгорания нагревают муфель, а от его стенок нагреваются находящиеся внутри изделия.

Продукты сгорания отводят в дымоход с помощью эжектора.

На одностопных печах использование рекуператоров при средней температуре дыма перед рекуператором около $630-660^{\circ}\text{C}$ обеспечивает подогрев воздуха до $350-390^{\circ}\text{C}$, что экономит 17-20 % топлива.

Печи могут обогреваться и электрическими нагревателями сопротивления.

Цикл термической обработки стали включает в себя нагрев до 700-800 °С, длительную выдержку при этой температуре, охлаждение в защитной атмосфере до 100-120 °С и часто длится 2,5-3 суток:



Цилиндрическая электрическая колпаковая печь мощностью 540 кВт для садки до 40 т с 2 загрузочными площадками. Компания WELDOTHERM GmbH, г. Эссен, Германия



С начала нагрева в печь подают максимально возможное количество теплоты, соответствующее тепловой мощности печи. Чем равномернее нагревается металл, тем больше допускаемая тепловая мощность.

Максимальное количество теплоты подается до тех пор, пока наиболее быстро нагреваемая часть садки (например, поверхность верхнего рулона) достигнет заданной температуры. Затем наступает период выравнивания температуры и расход топлива или электроэнергии начинает снижаться.

Период выравнивания температуры заканчивается в момент достижения заданного перепада температуры между наиболее быстро и наиболее медленно нагреваемыми частями садки; в этот момент подается минимальное количество теплоты.

По окончании периода выравнивания подача энергоносителя прекращается, колпак снимается и начинается охлаждение.

Под муфель по трубке подается защитный газ: пары воды, продукты неполного сгорания природного газа при $n=0,5-0,95$ или продукты разложения аммиака. Выбор защитной атмосферы определяется свойствами металла и требуемой степенью защиты поверхности: светлая (чистая) или слегка потемневшая. Обычно при светлом отжиге в газовых колпаковых печах для термообработки углеродистой стали применяется защитная атмосфера, состоящая из 95 % N_2 и 5 % H_2 .

В нижней части колпака и муфеля устроены песочные затворы, обеспечивающие необходимую герметизацию.

Теплообмен под муфелем интенсифицируют принудительной циркуляцией защитной атмосферы, осуществляемой вентилятором с крыльчаткой центробежного типа, помещенной под стопой внутри направляющего аппарата. Вентилятор захватывает защитный газ из внутренней полости стопы рулонов и через направляющий аппарат равномерно подает его вдоль стен муфеля.

Газ нагревается от муфеля и поступает во внутреннюю полость стопы через конвекторные кольца, расположенные между рулонами. Кольца имеют небольшую высоту (80-120 мм); проходя с большой скоростью между рулонами, газ отдает теплоту торцам рулонов за счет конвекции, значительно ускоряя их нагрев.

Чтобы защитный газ направлялся между рулонами, их внутреннюю полость закрывают сверху крышкой.

Для циркуляции защитного газа между витками, рулон перематывают так, чтобы между витками были зазоры. Для этого между витками закладывают профилированную проволоку или тонкий капроновый шнур, который после перемотки удаляют.

Недостатком применения распушённых рулонов является необходимость двукратной перемотки ленты - перед отжигом и после него. Однако применение распушённого рулона перспективно для обработки ленты термохимическими способами, при которых необходимо, чтобы газ омывал всю поверхность ленты (слайд 5).

Установленные по периметру колпака горелки обеспечивают торцевой подвод металла к стопе листов печи на слайде 6. Нагрев целесообразно вести именно так, потому что газовая прослойка между листами снижает теплопроводность в поперечном направлении в 30-40 раз по сравнению с теплопроводностью сплошного металла.

Камерные печи позволяют обеспечить любые температурные и тепловые режимы, однако в этих печах большое количество теплоты тратится непроизводительно на периодический нагрев кладки, и их трудно приспособить для поточного производства.

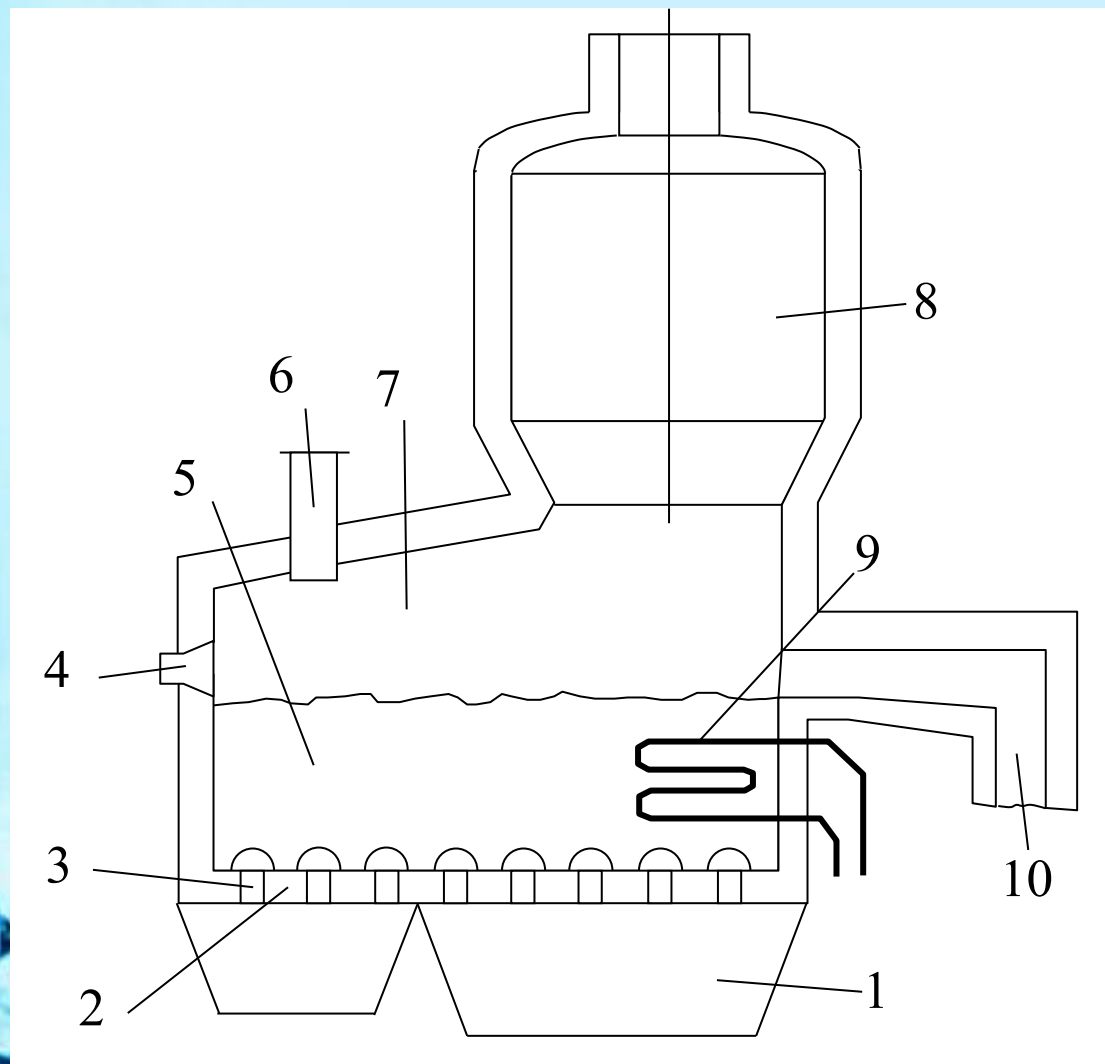
§ 10. Печи кипящего слоя

Являются печами-теплогенераторами, работающими по массообменному режиму. Используются для высокотемпературного обжига (окисления) сульфидных концентратов - сырья при производстве Zn, Cu, Ni, Mo и других металлов; кальцинации гидроксида алюминия, обезвоживания карналлита (минерала для производства магнезия).

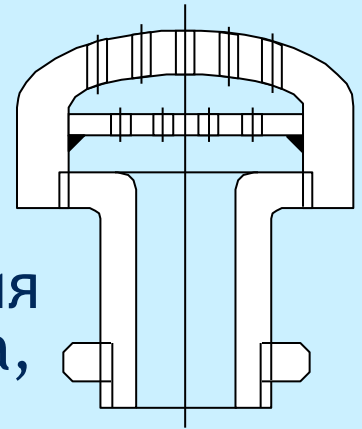
Печь представляет собой вертикально расположенную реакционную зону высотой от 9 до 17 м, имеющую круглое, овальное или прямоугольное сечение. Рабочее пространство реакционной камеры состоит из 2 областей: кипящего слоя и надслоевого сепарационного пространства. Кожух сварен из листового металла, футерован шамотом. Между кожухом и футеровкой - асбестовый лист.

Печь кипящего слоя для обжига сульфидных материалов:

- 1 - распределительная воздушная камера;
- 2 - под;
- 3 - воздушные сопла;
- 4 - горелка для разогрева печи перед пуском;
- 5 - кипящий слой;
- 6 - загрузочное устройство;
- 7 - форкамера;
- 8 - сепарационная камера;
- 9 - теплообменник;
- 10 - разгрузочное устройство



Под печи делают из огнеупорного бетона поверхность металлического листа с отверстиями, в которые вставляют грибообразные сопла. Сопло состоит из чугунного патрубка и навинчивающегося колпачка с отверстиями. Внутри колпачка находится решетка, отверстия которой не совпадают с отверстиями колпачка, что предотвращает провал обрабатываемого материала в воздушную коробку.



Чтобы добиться примерно равной продолжительности нахождения частиц в слое, устройства ввода и вывода материала из печи располагают на противоположных максимально удаленных друг от друга участках слоя. Шихту загружают в форкамеру из бункера через тарельчатый питатель и ленточный весовой дозатор; загрузочную воронку изготавливают из жаростойкой стали. Обожженный материал самотеком удаляется из печи через разгрузочное окно, попадая в сборный бункер, футерованный шамотом. Из разгрузочного устройства огарок выгружают с помощью шлюзового питателя.

Кипящий слой образуется в период пуска печи.

Обжиг сульфидных материалов нельзя начинать в пустой печи, так как это может привести к укрупнению частиц и спеканию слоя. Поэтому первоначально в печь загружают готовый огарок и разогревают футеровку сжиганием природного газа, подаваемого через пусковые горелки.

При достижении поверхностью кладки рабочей температуры осуществляемого в печи технологического процесса (550-1000 °С) в слой подают газообразный окислитель.

После того, как температура достигнет необходимого значения, начинают загружать сульфидную шихту. При дальнейшем повышении температуры последовательно отключают пусковые горелки.

При выходе на рабочий режим технологический процесс протекает в автогенном режиме за счет теплоты экзотермических реакций.

Из рассмотрения принципа действия печи можно сделать вывод, что это агрегат непрерывного действия с постоянными во времени параметрами теплового и аэродинамического режимов.

В печах кипящего слоя имеют место все три вида теплообмена, главную роль играет конвекция.

В момент соударения частиц с их поверхности срывается пограничный слой, что обеспечивает интенсивность теплообмена в 20-30 раз большую, чем в плотном слое.

Частицы шихты размером $0,1 \div 4$ мм представляют собой тонкие в тепловом отношении тела с критерием Био, не превышающем 10^{-2} .

Из-за огромной поверхности теплообмена, измеряемой тысячами м^2 на м^3 слоя, происходит быстрое выравнивание температуры газа и твердых частиц. Градиент температуры внутри слоя имеется только на небольшом участке толщиной несколько сантиметров, расположенном вблизи газораспределительных устройств (в области тепловой стабилизации). В остальном объеме слоя температура практически одинакова и составляет 930-1000 °С.

Таким образом, при управлении печью кипящего слоя задача заключается в том, чтобы на протяжении всего процесса обжига поддерживать в слое постоянную температуру, величина которой должна соответствовать его технологическим параметрам. Условие постоянства заданной температуры процесса распространяется и на реакционное пространство, расположенное над слоем, так как в нем продолжаются процессы окисления выносимой из печи пыли.



← Печь кипящего слоя
для обжига клинкера
при получении
высококачественного
цемента.
Изготовитель -
ОАО «Березовский
опытный завод
«Энергоцветмет»



ЗАО
«Техмонтаж»
строит печь
кипящего слоя на
заводе
«Электроцинк»



Конструкция печи должна обеспечивать завершенность технологического процесса. Для окисления частиц они должны находиться в рабочем пространстве минимальное время

$$t_{\min} = 4 \div 5 \cdot \frac{d}{w_{\text{OK}}},$$

где d - диаметр частиц, м;

w_{OK} - средняя скорость окисления сульфидов, $\sim 10^{-6}$ м/с.

Коэффициент $4 \div 5$ учитывает укрупнение частиц в результате слеживания.

Для усреднения t_{\min} кроме пространственного разобшения устройств ввода и вывода используют следующие меры: увеличивают отношение высоты слоя к его диаметру; вводят шихту непосредственно в слой, а не на его поверхность; размещают в слое перегородки, затрудняющие перемещение материала.

Под скоростью дутья понимают скорость w_{CB} , отнесенную к свободному сечению печи без учета материала.

Если под неподвижный слой кусковых материалов подавить газовый поток, имеющий небольшую скорость, то он будет фильтроваться через слой, как через пористое тело. При увеличении расхода газа наступит момент, когда слой перейдет в псевдооживенное состояние. Скорость газового потока, при которой устанавливается равенство между силами гидродинамического давления, действующей на частицы, и весом материала, называется скоростью начала псевдооживения w_{min} .

При дальнейшем увеличении скорости воздушного потока сначала часть, а затем и весь материал переходит во взвешенное состояние и выносится вместе с потоком из слоя. Скорость дутья, при которой твердые частицы начинают покидать слой, называют скоростью витания частиц w_{max} .

Очевидно, что при обжиге в кипящем слое должно выполняться условие

$$W_{\min} < W_{\text{CB}} < W_{\max} \cdot$$

При изучении кипящего слоя в качестве безразмерной скорости газового потока используют число псевдооживления

$$N = \frac{\overline{W}_{\text{CB}}}{W_{\min}}$$

Приравнивая силу гидродинамического давления потока силе тяжести, действующей на частицы, и допуская турбулентный характер движения среды (в кипящем слое турбулентное движение наступает при сравнительно малых значениях критерия Рейнольдса ~ 100), можно найти w_{\min} из критериальной зависимости

$$\text{Re}_{\min} = \left[\frac{\text{Ar}}{4,35} \cdot \frac{f}{(1-f)^{0,15}} \right]^{0,54} \cdot$$

На предыдущем слайде

$$Re_{\min} = \frac{w_{\min} \cdot d}{\nu} -$$

критерий Рейнольдса, в котором характерное значение скорости равно w_{\min} ;

$$Ar = \frac{o(f_A) \cdot o(f_H)}{[o(f_{TP})]^2} = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_M - \rho_\Gamma)}{\nu^2 \cdot \rho_\Gamma} -$$

критерий Архимеда (поскольку кипящий слой напоминает жидкость, его поведение подчиняется законам гидродинамики);

$$f = \frac{V_{\text{ПОР}}}{V_{\text{ПОР}} + V_M} \approx 0,4 -$$

порозность плотно лежащего слоя, то есть доля объема пустот в общем объеме при плотном слое.

Приравнивая силу давления потока газа на частицу (силу лобового сопротивления частицы) силе тяжести и силе трения при движении частицы, можно найти w_{\max} :

$$Re_{\max} = \frac{Ar \cdot f_{\kappa}}{18},$$

где $f_{\kappa} > f$ - порозность кипящего слоя.



Высокотемпературный циркулирующий кипящий слой (ВСКЦ) угля. ВЦКС - наиболее эффективная ресурсосберегающая технология, позволяет использовать в качестве топлива широкую гамму местных низкокачественных видов топлива

Для уменьшения пылевыноса необходимо увеличить высоту кипящего слоя и площадь сечения реакционной камеры над уровнем слоя, что приведет к уменьшению скорости потока газа над слоем и сепарации из него материала.

Пылевынос в печах кипящего слоя составляет 30-40 % от массы загружаемого материала и является основным фактором, ограничивающим производительность этих печей, которую оценивают по формуле:

$$A = 3600 \cdot \frac{N \cdot w_{\min} \cdot F_{\Pi}}{V_{\text{уд}}}, \text{ т/ч,}$$

где F_{Π} - площадь пода, м^2 ;

$V_{\text{уд}}$ - количество дутья, необходимое для окисления 1 т шихты в условиях заданного температурного режима, $\text{м}^3/\text{т}$.

Достоинства печей кипящего слоя:

- 1) возможность проведения технологического процесса без подачи топлива;
- 2) высокая удельная производительность и хорошее качество обожженного материала (у печей для обжига медных концентратов соответственно 20-100 т/(м²·сут), а степень десульфурации доходит до 75 %);
- 3) высокое содержание SO₂ в технологических газах.

Недостатки печей:

- 1) истирание частиц и большой пылевынос;
- 2) затраты энергии на подачу сжатого воздуха;
- 3) ограниченный диапазон скоростей ожижающего агента;
- 4) необходимость гранулометрической подготовки шихты;
- 5) эрозия аппаратуры.