**1. Установки для сушки сыпучих материалов**

* 1. **Общие сведения**

Сушила для сушки сыпучих материалов выполняются главным образом как установки непрерывного действия. К их числу относятся барабанные сушила, сушила для сушки в пневмопотоке и сушильные установки кипящего слоя. По характеру теплообмена в рабочей зоне эти устройства сильно отличаются между собой, что накладывает отпечаток на их конструкцию и рабочие показатели.

* 1. **Барабанные сушила**

*Тепловой и температурный режимы.* Тепловой и температурный режимы работы барабанных сушил неизменны во времени. Температура и влажность высушиваемого песка при этом меняются по длине барабана по мере продвижения песка от загрузочного к разгрузочному концу сушила: температура растет, а влажность уменьшается.

Температура и влагосодержание сушильного агента (в качестве которого обычно используется смесь дымовых газов и воздуха) также соответственно изменяются по длине сушильного барабана: температура падает, а влагосодержание растет за счет перехода влаги из песка в сушильный агент. Передача тепла к поверхности высушиваемого песка (т.е. в ЗТП) с учетом сравнительно низкого температурного уровня (не выше 700-8000 С) осуществляется в основном конвекцией в некоторой мере излучением. В этих сушилах протекает обычно проточный режим теплообмена. Однако лимитирующим звеном процесса сушки в этих установках является замедленная тепло- и массопередача внутри слоя песка. Поэтому с целью интенсификации процесса сушки конструктивно предусматривается разрыхление и перегребание слоя песка специальными лопатками на стенах барабана.

*Конструкция барабанного сушила.* Основной частью барабанных сушил является длинный стальной цилиндр (барабан), установленный с небольшим наклоном к горизонту (рис. 1). Барабан опирается на опорные ролики и вращается вокруг своей оси благодаря зубчатому венцу, связанному через понижающий редуктор с электроприводом. Влажный сыпучий материал через загрузочное устройство и питатели подается в верхнюю часть барабана и при его вращении (обычно со скоростью несколько оборотов в минуту) постепенно перемещается к его разгрузочному концу. Для ускорения сушки внутри барабана установлены стальные пластины в виде лопастей или секторов, перемешивающие и разрыхляющие сыпучий материал. Перед выдачей песок остужают до температуры ~50°С. Высушиваемый материал нагревается в барабанных сушилах смесью продуктов горения и воздуха. Сжигание топлива производится в отдельной топке, после чего продукты горения смешиваются в смесительной камере с воздухом для понижения их температуры до 800—850° С. При этой температуре сушильный агент поступает в барабан (у его загрузочного конца) и покидает барабан при температуре 100—120°С через газоотвод у разгрузочного конца барабана и направляется в очистительные циклоны, а оттуда в дымовую трубу.

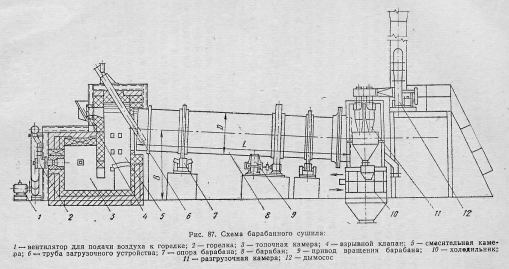


Рисунок 1 – Схема барабанного сушила

1 – вентилятор для подачи воздуха к горелке; 2 – горелка; 3 – камера;

4 – взрывной клапан; 5 – смесительная камера; 6 – труба загрузочного

устройства; 7– барабана; 8 – барабан; 9 – привод вращения барабана;

10 – холодильник; 11 – разгрузочная камера; 12 – дымосос

Тепло к высушиваемому материалу передается главным образом за счет конвекции и, несмотря на перемешивающие песок средства, сушка его происходит сравнительно медленно.

Удельный расход тепла на удаление 1 кг влаги из материала для барабанных сушил около 4000—5000 кДж/кг. Технические характеристики типовых барабанных сушил, разработанных институтом «Теплопроект», приведены ниже:

Производительность сушил, т/ч3,06,4515,3543,0

Количество удаляемой влаги, кг/ч31466016104500

Длина барабана, м4,06,08,012,0

Диаметр барабана ,м1,01,21,62,2

**1.3 Сушила для сушки в пневмопотоке и кипящем слое**

*Тепловой и температурный режим.* Сушила для сушки в пневмопотоке и кипящем слое работают в слоевом режиме, выгодно отличаясь от сушил барабанного типа большей эффективностью и удельной производительностью благодаря интенсивному протеканию процессов тепло- и массообмена и, следовательно, более быстрому и равномерному удалению влаги из высушиваемого материала. В установках для сушки в пневмопотоке обеспечиваются условия существования взвешенного слоя, когда скорость потока сушильного агента превышает так называемую скорость витания твердых частиц, в результате чего последние уносятся потоком. В сушилах с кипящим слоем сыпучий материал под динамическим воздействием потока сушильного агента находится в разуплотненном состоянии и энергично перемешивается. Этим обеспечивается резкое увеличение удельной поверхности нагрева (м2/кт) и рост коэффициента теплоотдачи. Интенсивный конвективный перенос во взвешенном и кипящем слоях способствует быстрому протеканию процесса сушки. В сушилах со взвешенным и кипящим слоем обеспечивается практически камерный режим обработки, что вполне допустимо в случае сушки сыпучих материалов. Вместе с тем кипящий слой, подобно жидкости, обладает хорошей текучестью, что позволяет легко (конструктивно) осуществить технологически непрерывный процесс, т, е. непрерывную загрузку влажного материала и непрерывный слив — выгрузку высушенного материала. Что же касается сушки в пневмопотоке, то условие, чтобы среднее время пребывания частицы в рабочем пространстве печи (ЗТП) было бы больше времени, необходимого для протекания процесса сушки, усложняет конструкцию установки, вызывая необходимость в громоздкой и длинной рабочей камере — трубе.

*Конструкцияустановки для сушки в пневмопоток.* Установка для сушки в пневмопотоке представляет собой вертикальную трубу (изготовленную обычно из чугуна С учетом сильного абразивного износа), в нижнюю часть которой из бункера через шлюзовой питатель подается влажный сыпучий материал (рис. 2). Здесь частички подхватываются восходящим потоком горячего сушильного агента (обычно это смесь продуктов горения и воздуха, поступающая из топки со скоростью от 10 до 40 м/с при температуре около 700° С) и уносятся вверх по трубе.

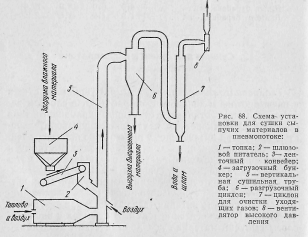


Рисунок 2 – Схема установки для сушки сыпучих материалов в пневмопотоке. 1 – топка; 2 – шлюзовой питатель; 3 – ленточный конвейер; 4 – загрузочный бункер; 5 – вертикальная сушильная труба; 6 – разгрузочный циклон; 7 – циклон для очистки уходящих газов; 8 – вентилятор высокого давления

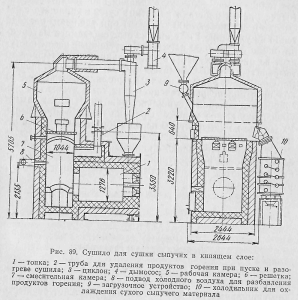


Рисунок 3 – Сушило для сушки в кипящем слое

1 – топка; 2 – труба для удаления продуктов горения при пуске и разогреве сушила; 3 – циклон; 4 – дымосос; 5 – рабочая камера; 6 – решетка; 7 – смесительная камера; 8 – подвод холодного воздуха для разбавления продуктов горения; 9 – разгрузочное устройство; 10 – холодильник для охлаждения сухого сыпучего материала

Пройдя трубу и освободившись от влаги, песок попадает в циклон, где он отделяется от газа-носителя и затем выгружается. Уходящие газы перед выбрасыванием в атмосферу подвергаются дополнительной очистке в циклоне с увлажнением.

*Конструкция сушила с кипящим слоем.* Сушило с кипящим слоем (рис. 3) представляет камеру, дно которой выполнено в виде решетки. На решетку помещают слой подлежащего сушке сыпучего материала, а под решетку подводят горячий (с температурой 800—850° С) сушильный агент из топки и из смесительной камеры под таким давлением, чтобы частицы материала находились во взвешенном состоянии, а не уносились бы потоком газов, как в случае сушки в пневмопотоке. Свежие горячие газы, проходящие через кипящий слой, интенсивно высушивают материал благодаря высоким значениям коэффициентов тепло- и массообмена. Удельная производительность (отнесенная к площади решетки) сушил кипящего слоя высока и достигает 7500 кг/(м2-ч) при удельном расходе тепла на удаление I кг влаги из высушиваемого материала около 3600—4500 кДж/кг. Высушенный песок поступает из рабочей камеры в холодильник, где остывает до температуры ~50°С, и затем выгружается из установки. Верхняя часть рабочей камеры выполняется с несколько большим поперечным сечением для того, чтобы снизить скорость движения сушильного агента и тем самым уменьшить вынос мелких фракций из рабочей камеры. Уходящие из камеры газы перед выбрасыванием их в атмосферу очищаются от пыли в циклоне.

Сушильные установки с кипящим слоем получают все более широкое распространение благодаря эффективности их работы, возможности автоматизации и простоте регулирования.

**2.** **Установки для сушки литейных форм и стержней**

**2.1 Принцип действия устройство сушильных установок**

Различные способы подвода тепла к формам и стержням определяют в первую очередь особенности конструкции сушильных установок. Так, нагрев может осуществляться либо путем генерации тепла в самом высушиваемом материале (сушила ТВЧ), либо путем передачи тепла к поверхности материала извне как излучением, так и конвекцией. Наибольшее распространение для сушки литейных форм и стержней получили сушила, в которых тепло к материалу передается от горячих продуктов сгорания, смешанных с воздухом или возвратом (отработанными продуктами сгорания). Так как технология процессов сушки предусматривает сравнительно невысокий температурный уровень (до 450°С), то при этих условиях преобладает передача тепла конвекцией.

Помимо теплотехнических соображений, на конструкцию сушила оказывает влияние вид высушиваемых изделий, главным образом их масса и габариты. Так, для сушки сравнительно мелких изделий (стержней), которые могут быть легко перемещены через рабочую камеру сушильной установки при помощи разного рода вертикальных, наклонных и горизонтальных конвейеров, применяются сушила непрерывного действия. Эти установки хорошо вписываются в поточные линии современных литейных цехов и хорошо удовлетворяют требованиям массового производства с установившейся программой и сортаментом изделий.

Крупные стержни и формы, которые не представляется возможным непрерывно транспортировать через рабочие камеры, сушат в установках периодического действия с выкатными этажерками и тележками. Загрузка изделий при этом облегчается благодаря кран-балкам и мостовым кранам. Особо крупные и громоздкие формы, для которых потребовался бы очень мощный механизм выдвижения тележки, сушат в ямных сушилах со съемным сводом, через который и ведется загрузка изделий в рабочую камеру мостовым краном.

**2.2 Сушила с конвективным режимом работы**

*Тепловой и температурный режим.* Сушила с конвективным режимом работы делятся на установки периодического действия (камерные) и непрерывного действия. Однако в обоих случаях на их конструкцию и работу влияет режим тепловой работы, определяющий преобладание конвективного теплообмена в рабочих камерах при низком уровне температур (300—450°С). Как отмечалось в гл. III этого тома, интенсификация конвективного теплообмена и улучшение использования топлива достигается применением циркуляционного характера движения сушильного агента с частичным удалением отработанных газов. В старых конструкциях сушил для этой цели использовалась естественная циркуляция, а в современных установках широко применяются инжекторы, вентиляторы и дымососы. Кроме этого, рециркуляция сушильного агента способствует повышению его влагосодержания замедлению процесса сушки, в особенности на его ранней стадии, что весьма важно при сушке массивных форм и стержней, в которых могут возникнуть трещины при быстром неравномерном удалении влаги с поверхности.

Естественно, что независимо от высказанных соображений тепловой и температурный режимы работы сушил периодического действия характеризуются изменением поля температур в рабочей камере во времени, тогда как поле температур внутри рабочих камер сушил непрерывного действия во времени не изменяется.



Рисунок 4 – Камерное сушило с выкатнойтележкой и с искусственной циркуляцией

1 – дымовой канал; 2 – дымовой боров; 3 – короб для подачи и распределении поворота в рабочую камеру; 4 – выкатная платформа;5 – дверь; 6 – рабочая камера ушила; 7 – механизм подъема двери;8 – рециркуляционный вентилятор; 9 – шибер; 10 – трубопровод для отвода отработанного газа

*Конструкции сушил периодического действия.* К таким сушилам относится камерное сушило с выкатной тележкой (платформой), предназначенное для сушки форм и стержней. Сушило состоит из рабочей камеры и двух тонок, расположенных ниже пода камеры и соединенных с ней дымовыми каналами, играющими одновременно и роль смесительных камер (рис. 90). Стены и свод рабочей камеры сушила выполняют обычно из красного кирпича толщиной 0,23—0,35 м. Свод камерного сушила имеет толщину 0,115 м и сооружается в виде отдельных сводов, опирающихся на двутавровые балки. В качестве теплоизоляции используют, шлаковую вату, трепельный порошок или диатомитовый кирпич. Двери камерных сушил представляют собой каркас, с двух сторон обшитый листовым железом; пространство между листами заполнено легковесным кирпичом или шлаковой ватой. Двери, как правило, открываются вручную, а большие сушила оборудуются для этой цели подъемными механизмами с электроприводом или пневмоцилиндром. Тележка с установленными на ней формами или крупными стержнями перемещается по уложенным на поду сушила рельсам ручной или электрической лебедкой. Сушило оборудовано двумя топками, расположенными ниже уровня пода цеха. В топках сжигают любое имеющееся в распоряжении топливо; твердое, жидкое или газообразное. Стены топочных камер футеруют шамотом. Продукты горения направляются из топок в дымовые каналы, расположенные под подом сушильной камеры вдоль продольных стен. В этих каналах для снижения температуры дыма его смешивают с воздухом или с уходящими газами (возвратом), имеющими значительно меньшую температуру. Полученная смесь (сушильный агент) поступает в камеру через отверстия в сводах дымовых каналов. Поднимающиеся вверх потоки горячих газов увлекают за собой более холодные газы, находящиеся в камере, и вызывают в ней естественную циркуляцию, способствующую выравниванию температуры по всему объему камеры и ускорению процесса сушки. Дымовые газы удаляются из камеры через боров, расположенный вдоль продольной оси камеры.

Для повышения интенсивности процессов сушки в камерных сушилах широко применяется принудительная рециркуляция продуктов горения. В этом случае часть отработанных продуктов отбирается на борова при помощи дымососа, находящегося вне сушила, и подается в коробы, расположенные по всей длине рабочей камеры сушила (внутри ее с обеих сторон, над сводами дымовых каналов). Выходящие с большой скоростью (15—20 м/с) из сопел коробов отработанные газы усиливают рециркуляцию в камере сушила, интенсивно подсасывая свежие дымовые газы из отверстий в сводах дымовых каналов. Введение принудительной рециркуляции сокращает продолжительность сушки в 1,3—1,5 раза.

Камерные сушила часто работают в режиме как естественной, так и вынужденной циркуляции. В начале сушки газообразные продукты, поступающие в камеру, быстро остывают и поэтому в первый период, длительность которого составляет 15—20% от всего времени сушки, установка работает обычно с естественной циркуляцией газов. После разогрева камеры включают дымосос и доводят температуру до требуемой, поддерживая ее в течение последующего периода, длительность которого составляет 40—50% от полного времени сушки. После этого выключают подачу топлива, и происходит, медленное охлаждение материала вместе с камерой до температуры 150—200° С. Тележку выкатывают из сушила, а на ее место помещают новую садку.

Камерные сушила, используемые для сушки мелких и средних стержней, отличаются от описанного только несколько меньшими размерами камеры, наличием только одной топки и соответственно одного дымового капала, а также способом загрузки высушиваемого материла. Стержни обычно размещают на металлических этажерках, вдвигаемых в рабочую камеру. Для облегчения перемещения этажерки делают сравнительно небольшими: в сушилке, как правило, помещают 2—4 этажерки одновременно.

Внутренние размеры камерных сушил меняются в широких пределах и зависят от их назначения и условий размещения в цехе. При конструировании сушил рекомендуется не превышать следующие максимальные размеры (внутренние): длина 10 м; ширина 5,5—6 м; высота 4,0— 4,5 м. Чтобы обеспечить циркуляцию газов в сушиле, должны бить выдержаны минимально допустимые расстояния между загружаемым материалом и подом 0,5—0,7 м; между материалом и сводом 0,4—0,5 м; между материалом и боковыми стенами над дымовыми каналами 0,4— 0,5м.

Ямное сушило (рис.91) применяется для сушки крупных форм. Рабочая камера ямного сушила располагается ниже уровня пола цеха, и загрузка форм в нее осуществляется через съемный свод с мостовым краном. Сушило занимает в цехе меньшую площадь, так как здесь отпадает необходимость в рельсовых путях и механизмах для перемещения тележки. При загрузке нижний ряд опок устанавливают на стеллажи, а последующие — одну на другую с металлическими прокладками между ними.

Так как топка в ямном сушиле расположена рядом с рабочей камерой, то величина геометрического напора, создаваемая разностью плотностей столбов дымовых газов в сушиле и воздуха вне его, невелика. Поэтому для повышения скорости движения газов в ямных сушилах всегда применяют принудительную рециркуляцию. Продукты горения поступают из топки в вертикальный канал, в который снизу подсасывается возврат за счет инжектирующего действия струи отработанных дымовых газов, подаваемых дымососной установкой. Дымовые газы поступают в сушильную камеру из вертикальных каналов через отверстия. Покидающие камеру газы отводятся в борова, перекрытые чугунными плитами с отверстиями. Наибольшее распространение получили ямные сушила с размерами рабочих камер 9,0X5,0X3,5; 11,0X5,0X3,5; 13,0X3,5 м.

В камерных и ямных сушилах расход топлива на удаление 1 кг влаги из высушиваемого материала составляет 13500—20000 кДж/кг, причем большие значения соответствуют сушке форм стального литья, а меньшие — сушке мелких стержней.

Разработка новых методов покрытия внутренних поверхностей литейных форм быстротвердеющими смесями позволяет более широко заменять сквозную сушку форм более быстрой и производительной поверхностной подсушкой.

В качестве примера установки, используемой для этой цели, может служить сушило с сушкой горячим воздухом (рис. 6). Сушило представляет собой переносную рамную конструкцию, устанавливаемую над предназначенной для подсушки полуформой. Воздух, забираемый вентилятором из окружающего пространства, направляется в так называемый калорифер, представляющий собой теплоизолированную камеру с установленными в ней электрическими нагревателями сопротивления в виде спиралей.

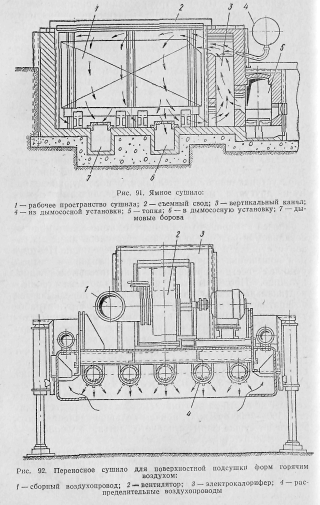


Рисунок 5 – Ямное сушило

1 – рабочее пространство сушила; 2 – съемный свод; 3 – вертикальный канал;4 – из дымососной установки; 5 – топка; 6 – в дымососную установку;7 – дымовые борова

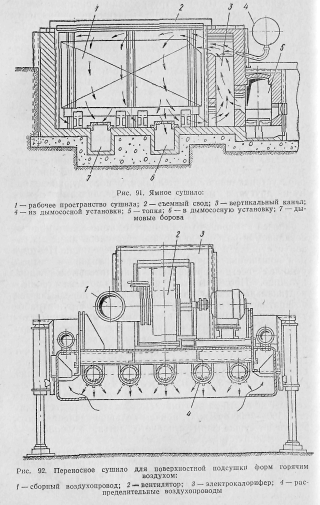


Рисунок 6 – Переносное сушило для поверхностной подсушки форм горячим воздухом

1 – сборный воздухопровод; 2 – вентилятор; 3 – электрокалорифер; 4 –распределительные воздухопроводы

Вентилятор и калорифер установлены наверху рамы сушила. Нагреватели, обдуваемые потоком воздуха с высокой скоростью, быстро нагревают его до температуры 300—350°С, после чего горячий воздух поступает в пять распределительных воздухопроводов, расположенных внизу рамы. Каждый воздухопровод имеет сопла, через которые горячий воздух с большой скоростью направляется на поверхность литейной формы. Часть отработанного воздуха через сборный воздухопровод засасывается вентилятором и вновь попадает в калорифер для обеспечения рециркуляции, которая протекает здесь по незамкнутому циклу.

*Конструкции сушил непрерывного действия*. Сушильные установки непрерывного действия представляют собой вытянутые (в высоту или в длину в зависимости от удобства размещения в цехе) камеры, внутри которых с помощью конвейеров различных конструкций высушиваемый материал перемещается от загрузочного к разгрузочному концу. Из-за трудности создания надежных конвейерных устройств для транспортировки тяжелых форм и крупных стержней эти сушила применяются только для сушки мелких и средних стержней. Сушила непрерывного действия работают с постоянным во времени тепловым режимом.

Вертикальное конвейерное сушило (рис. 7) выполняется в виде башни со стенами рамно-щитовой конструкции. Пространство между внутренним и внешним стальными листами обшивки рам заполняется теплоизоляционным материалом (шлаковой или стеклянной ватой). Внутри сушила движется вертикальный конвейер, состоящий из двух непрерывных роликовых цепей с подвешенными на них этажерками. На полки этажерок укладывают подвергаемые сушке стержни. Количество полок на каждой из этажерок зависит от размера стержней. При массе стержней до 5 кг обычно на этажерке устанавливают по три полки, при сушке более крупных стержней количество полок уменьшается. Изменяя скорость движения конвейера, можно устанавливать различное время пребывания стержней *в* сушиле в зависимости от их массы. Загрузка стержней производится со стороны восходящей ветви конвейера, разгрузка — с противоположной стороны, причем загрузка и выгрузка обычно механизированы.

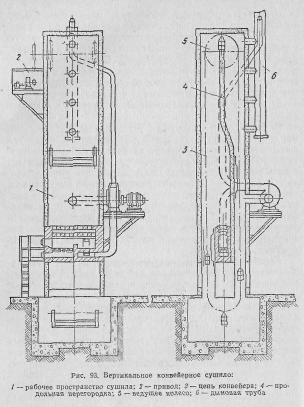


Рисунок 7 – Вертикальное конвейерное сушило

1 – рабочее пространство сушила; 2 – привод; 3 – цепь конвейера; 4 – продольная перегородка; 5 – ведущее колесо; 6 – дымовая труба

Топка сушила находится между двумя ветвями конвейера; размещена выше уровня загрузочного и разгрузочного окон, чтобы предотвратить выбивание горячих дымовых газон. Топливо сжигается. б топке, расположенной внутри смесительной камеры, в которой происходит перемешивание выходящих из топки продуктов горения (с температурой 1000—1200° С) с холодным воздухом или отработанными газами. Наружная камера одновременно играет роль тепловой изоляции кладки топки. Приготовленный таким образом сушильный агент выходит из камеры смешения через отверстия в ее своде и поступает в сушильную камеру со стороны восходящей ветви конвейера. Поднявшись в верхнюю часть сушила, дымовые газы огибают перегородку, опускаются в нижнюю часть сушила, откуда дымососом часть их отводится для рециркуляции, а часть поступает в дымовую трубу. Вместо сплошной перегородки часто используются газоотбойные щиты, устанавливаемые над топкой. Меняя угол наклона этих щитов при помощи лебедки, можно регулировать распределение газовых потоков в сушильной камере. Помимо этого, дымовая труба соединена с верхней частью сушильной камеры четырьмя короткими трубопроводами с заслонками на каждом из них. Все эти средства позволяют регулировать работу сушила и подбирать тот режим сушки, который требуется для данных стержней.

Стержни перед выдачей из сушила охлаждаются. Зоной охлаждения служит участок нисходящей ветви конвейера между дымоотборным отверстием и разгрузочным окном. Охлаждение стержней осуществляется воздухом, подсасываемым в сушильную камеру через окно разгрузки.

Технические характеристики типовых вертикальных сушил, разработанных институтом «Теплопроект», приведены ниже:

Производительностьсушила, кг/ч 800130017502500

влаги,кг/ч 42 68 92 131

Расход тепла на удаление

1 кг влаги, кДж/кг .26700210001960018000

Общее число этажерок в сушиле 18 26 28 35

Горизонтальное конвейерное сушило (рис. 8) представляет собой теплоизолированный коридор. Внутри коридора перемещается цепной конвейер, который делает несколько поворотов в горизонтальной плоскости. К цепи конвейера подвешены этажерки, на которые укладывают влажные стержни. Торцы сушила остаются открытыми

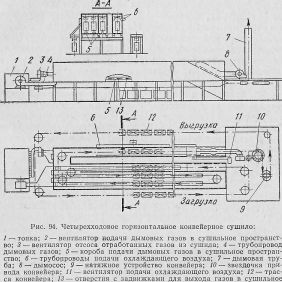


Рисунок 9 – Четырехходовое горизонтальное конвейерное сушило (для входа и выхода непрерывно движущегося конвейера).

1 – топка; 2 – вентилятор подачи дымовых газов в сушильное пространство;3 – вентилятор откоса отработанных газов из сушила; 4 – трубопровод дымовых газов; 5 – короба подачи дымовых газов в сушильное пространство; 6 – трубопроводы подачи охлаждающего воздуха; 7 – дымовая труба; 8 – дымосос; 9 – натяжное устройство конвейера;10 –звездочка привода конвейера; 11 – вентилятор подачи охлаждающего воздуха; 12 – трасса конвейера; 13 – отверстия с задвижками для выхода газов в сушильное пространство

Чтобы избежать попадания горячих газов на рабочую площадку, сушило поднято над уровнем пола цеха на высоту около 2 м и конвейер входит в него наклонно. Сушильная камера выполняется сборной из отдельных панелей с теплоизоляционной прокладкой. В качестве теплоизоляции служит шлаковая или стеклянная вата. Сборка каркаса с панелями осуществляется па болтах что допускает легкую смену панелей. Часть потолочных панелей не крепится болтами, а лежит свободно и играет роль предохранительного клапанана случай взрыва в рабочем пространстве.

Топка в таких сушилах вынесена из рабочей камеры и дымовые газы подаются вентилятором по металлическому дымоходу. Продукты горения поступают в короба, расположенные па полу сушила, Поступление сушильного агента в рабочее пространство регулируется задвижками. Отработанные дымовые газы отбираются из предпоследнего и последнего коридоров и используются для рециркуляции. Последний ход сушила играет роль зоны охлаждения. В него подается атмосферный воздух для охлаждения стержней перед выходом из сушила. Часть топочных газов, смешанных с воздухом в зоне охлаждения, отсасывается вентилятором и выбрасывается в атмосферу. Наличие вынесенной топки и принудительной подачи сушильного агента позволяет легко регулировать требуемый режим сушки по всему рабочему пространству. Производительность горизонтальных конвейерных сушил 2000—3000 кг/ч при количестве испаряемой влаги до 140—160 кг/ч и расходе тепла на 1 кг удаляемой влаги 14500—19500 кДж/кг.

Отопление всех описанных сушильных установок может осуществляться любым видом топлива (твердым, жидким или газообразным), сжигание которого осуществляется с помощью топливосжигательных устройств.

**3. Расчет процессов сушки**

Расчет процесса сушки производится для нахождения необходимого для нормальной работы сушила количества сушильного агента и определения расхода тепла (топлива). Тип сушила, характеристики высушиваемого материала и вид топлива обычно бывают заданы. Режим сушки выбирают, исходя из технологических соображений и вида форм и стержней.

При такой постановке задачи расчет сводится к совместному рассмотрению балансов влаги и тепла при процессе сушки. Очевидно, что вся влага, удаляемая из материала при сушке, переходит к сушильному агенту, повышая влагосодержание последнего от начального dнач (на выходе в сушило) до конечногоdкон (на выходе из сушила). Тогда, исходя из закона постоянства массы:

mвл = L(dкон –dнач) кг, (1)

гдеL — количество сухогосушильного агента, кг сухого газа (возд).

Количество необходимого сухого сушильного агента удобно выразить, отнеся его к 1 кг удаляемой из высушиваемого материала влаги:

l=L/ mвл =1/ dкон –dначкг/кг исп. вл.(2)

Все последующие операции по совместному анализу балансов тепла и массы для процесса сушки могут быть наиболее эффективно осуществлены с помощью I—d диаграммы, подробно описанной в гл. II первого тома учебника. Основными параметрами I—d диаграммы служат энтальпия I (кДж/кг) и влагосодержание d (кг/кг сух. возд). Диаграмма I—d построена для влажного воздуха, однако с ее помощью можно производить расчеты сушки не только воздухом, но и дымовыми газами, а также смесью дымовых газов с воздухом.

При расчете процессов сушки с помощью I—d диаграммы следует последовательно отображать на ней имеющие место в сушиле явления: подготовку сушильного агента перед его подачей в рабочую камеру (т. е. подогрев воздуха в случае использования воздуха в качестве сушильного агента); смешение продуктов горения с воздухом или возвратом в случае сушки дымовыми газами и собственно процесс сушки.

Ниже рассмотрен порядок отображения на I—d диаграмме процессов сушки различными сушильными агентами. Это отображение будет в дальнейшем называться «построение процесса сушки».

*Сушка воздухом.* Для построения на I—d диаграмме процесса сушки воздухом предварительно определяют его начальные параметры φвоз и Твоз в зависимости от времени года и местности. По этим данным на диаграмме находят точку А (рис. 10). Для осуществления процесса сушки воздух необходимо подогреть до температуры Тнач (температура воздуха на входе в сушильную камеру). Эту температуру принимают на 150—250° С выше рекомендуемой технологией температуры сушки, поскольку указанная разность температур между сушильным агентом и поверхностью сушимых изделий характерна для значительного большинства сушил с теплопередачей преимущественно конвекцией. Эта разность температур и создает необходимый для процесса сушки тепловой поток к высушиваемой поверхности. Процесс подогрева на диаграмме изображается прямой линией АВ, параллельной линиям постоянного влагосодержания d=const, так как при подогреве начальное влагосодержание воздуха остается неизменным, а изменяется только его энтальпия. Точка В характеризуется параметрами

dнач = dвоз, Тнач, Iнач.

В процессе сушки влагосодержание воздуха и его температура изменяются. Влагосодержание воздуха возрастает за счет удаления влаги из материала, а его температура снижается до величины Ткон вследствие затраты тепла на процесс сушки. Температура Ткон соответствует моменту выхода сушильного агента из сушильной камеры. Эту температуру принимают равной рекомендуемой (по технологическим условиям) температуре сушки или величине несколько меньшей в случае, если садка загружается в холодную камеру, и тогда учитывается средняя за период температура уходящих газов. (Во всех случаях выбирать параметры процесса сушки ниже линии относительной влажности φ=100% нельзя, так как насыщенный пар частично конденсируется и влага оседает на высушиваемых изделиях, что резко ухудшает качество форм и стержней.)

Если в процессе сушки все вводимое в сушило тепло расходуется исключительно па удаление влаги из материала, то происходит так называемый *теоретический процесс сушки*, который протекает при постоянной энтальпии сушильного агента. На I—d диаграмме он изображен прямой линией ВС', параллельной линиям постоянной энтальпии I== const до пересечения в точке С' с изотермой Ткон =const. Энтальпия сушильного агента (в данном случае воздуха) при теоретическом процессе сушки остается постоянной, поскольку тепло, затраченное на испарение влаги, возвращается воздуху с водяными парами, несущими в себе скрытую теплоту парообразования.

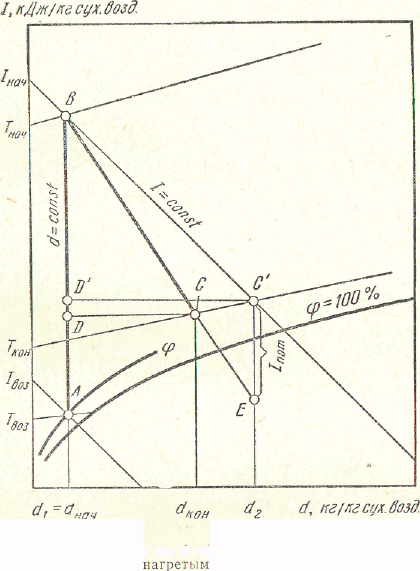


Рисунок 10 – ПостроениеI–d-диаграммепроцессасушки нагретым воздухом

Для определения количества сухого воздуха lтеор, требующегося для удаления 1 кг влаги из материала, находят по шкале влагосодержаний разность конечного d2 и начального d1 = dнач влагосодержаний воздуха, соответствующих началу и концу теоретического процесса сушки, а затем подставляют эту величину в выражение (XIII-37). Отрезок (d2—d1) можно заменить отрезком (D’—С'), измеренным в миллиметрах и умноженным на масштаб. Точку D' находят следующим построением. Из точки С' проводят линию, параллельную оси абсцисс до пересечения с вертикальной прямой, 'характеризующей влагосодержание воздуха в начале процесса. Масштаб влагосодержаний Md зависит от общего масштаба диаграммы и указывается обычно на оси абсцисс.

*Действительный процесс сушки* отличается от теоретического тем, что учитывается расход тепла на потери разного рода (аккумуляцию тепла высушиваемым материалом, транспортирующими устройствами, непосредственно сушильной камерой и т. п.). Эти затраты тепла уменьшаютэнтальпию сушильного агента. Расчет действительного процесса сушки сводится к определению изменения энтальпии сушильного агента, зависящего от величины тепловых потерь. Для построения действительного процесса сушки по I—d диаграмме предварительно находят величину перечисленных выше потерь, относя их к единице массы (1 кг) испаренной влаги.

Потери тепла на нагрев материала дм, отнесенные к 1 кг испаренной влаги, находят с помощью выражения

qM =MM cM (TMкон -ТМнач)/mвлкДж/кг исп. вл.,(3)

гдеММ— масса материала после сушки, кг;

CM— средняятеплоемкостьпесчано-глинистых смесей,

принимаемаяравной0,837кДж/(кг\*К);

ТМ кон — конечная температура материала, °С;

ТМнач — начальная температура материала, °С.

Потери тепла на нагрев транспортирующих устройств qтр, отнесенные к 1 кг испаренной влаги:

qтр =Mтр cM (Tтркон –Ттрнач)/mвлкДж/кг исп. вл.,(4)

гдеМтр— масса транспортирующих устройств, кг;

Cтр— средняятеплоемкость материала транспортирующих

устройств,кДж/(кг\*К).

Потери тепла на аккумуляцию камерой сушила qакк, отнесенные к 1 кг испаренной влаги:

qакк =Mкл cкл (Tсркон –Тсрнач)/mвлкДж/кг исп. вл.,(5)

гдеМкл— масса кладки камеры сушила, кг;

Cср— средняятеплоемкость материала кладуки камеры,

кДж/(кг\*К);

Тср кон — средняя конечная температура кладки, °С;

Тсрнач —средняя начальная температура кладки, °С.

Для нахождения средних температур по толщине стен используют метод конечных разностей.

Неучтенные потери принимают равными 5-10% от величины найденных суммарных потерь (исключая потери тепла на нагрев сухого материала).

После суммирования величин найденных тепловых потерь находят потери теплосодержания, относя их к 1 кг сухого воздуха:

Iпот =∑qпот /lтеоркДж/кг сух.воз.(6)

Полученную величину в масштабе энтальпий откладывают от точки С’ по вертикали d2 =const вниз (отрезок С’E). Точку Е соединяют с точкой В начала процесса сушки. Таким образом, действительный процесс сушки, протекающий с уменьшением энтальпии воздуха, изображается на I–d диаграмме прямой линией ВЕ. Поскольку процесс сушки заканчивается при заданной температуре уходящего из сушила воздуха Ткон , то на пересечении линии ВЕ с изотермой Ткон находят точку С, соответствующую концу действительного процесса сушки и характеризующуюся параметрами воздухаdкон, Ткон, Iкон. Проведя из точки С прямую линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с прямой АВ (dнач =const) в точке D, находят величину отрезка CD, соответствующую разности влагосодержаний воздуха (dкон - dнач) в действительном процессе сушки. Подставляя величину(dкон - dнач) в выражение (2) , определяют действительное количество сухого воздуха, необходимого для удаления 1 кг влаги из высушиваемого материала.

Расчет воздуха в объемных единицах можно найти по формуле

Vдейств =Vlдействм3/кг исп. вл.,(7)

где V– объем влажного воздуха, приходящего на 1 кг сухого

воздуха при атмосферном давлении. При температуре

200 С можно принять V=0,86 м3/кг.

Расход тепла для удаления 1 кг влаги можно найти по изменению энтальпии воздуха при его подогреве от Твоз до Тнач:

q=lдейств (I’нач-Iвоз)-сТМначкДж/кг исп. вл.,(8)

где (I’нач-Iвоз)– разность энтальпий воздуха, определяемая по отрезку

АВ с учетом масштаба энтальпии Мr (указываемом

обычно на оси ординат).

сТМнач – количество тепла, кДж/кг исп. вл., внесенного в сушило

влагой, содержащейся в материале при начальной

температурематериала ТМнач ;

с– теплоемкость воды, равная 4,187 кДж/(кг\*К);

Расход тепла на подогрев воздуха за цикл сушки равен

Qцикл=qmвлкДж.(9)

*Сушка дымовыми газами.* Для построения процесса сушки дымовыми газами предварительно определяют начальные параметры продуктов горения ТД(как действительную температуру горения) и dД на выходе из топки. По этим данным строят точку В’, соответствующую параметрам продуктов горения на воздухе в сушильную камеру (рис. 11).

Как уже отмечалось, температуру Тнач выбирают, исходя из требований технологии процесса сушки. Так как эта температура должна быть существенно меньше температуры продуктов горения, то для снижения последней смешивают дымовые газы с атмосферным воздухом или возвратом. Рассмотрим сначала порядок построения процесса сушки смесью дымовых газов с воздухом.

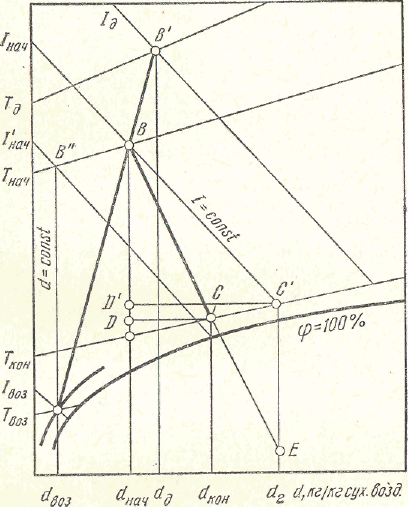


Рисунок 11 – Построение на I—d-диаграмме процесса сушки смесью дымовых газов и воздуха

Для построения этого процесса на I—d диаграмме описанным выше путем находят точку А, характеризующуюся начальными параметрами воздуха dвоз, Tвоз, и затем соединяют ее с точкой В'. Прямая АВ’ изображает процесс смешения дымовых газов с воздухом. Значение температуры воздушно-дымовой смеси на входе в сушильную камеру принимают так же, как и в предыдущем случае (для сушки воздухом), т. е. на 150—250°С выше технологически рекомендуемой температуры сушки.

Пересечение прямой АВ’ с изотермой Тнач дает точку В, характеризующуюся параметрами dнач, Тнач, Iнач. Принимая температуру уходящих из сушила газов Ткон равной технологически рекомендуемой температуре сушки, дальнейшее построение процессов сушки дымовыми газами проводят аналогично построению процесса сушки воздухом.

Количество исходной смеси воздуха и дымовых газов, требующееся для удаления 1 кг влаги из высушиваемого материала в теоретическом процессе сушки, находят из выражения

lтеор =1/( d2 - dнач) кг/кг исп. вл., (10)

здесь отрезок C'D' соответствует разности влагосодержаний (d2 - dнач) (см. рис. 11). То же в действительном процессе

lдейств =1/( dкон - dнач) кг/кг исп. вл.,(11)

Здесь отрезок CD соответствует разности влагосодержаний (dкон - dнач) с учетом масштаба влагосодержаний Мd.

Расход тепла на удаление влаги определяют по формуле (аналогичной процессу сушки воздухом) по разности энтальпий дымовых газов. В технических расчетах обычно используется величина низшей теплоты сгорания топлива Qрн , определяемая при условии, что вся влага, образующаяся при горении топлива, находится в парообразном состоянии при температуре 20° С. Поэтому вместо энтальпии Iнач, фактически соответствующей точке В, следует учесть энтальпию Iнач (см. рис. 11), соответствующую точке В", характеризующейся энтальпией тех же газов, при той же температуре Tнач, но при влагосодержаний, соответствующем 20°С (т. е. практически dвоз).

Тогда

q=lдейств (I’нач-Iвоз)-сТМначкДж/кг исп. вл.(12)

Здесь с учетом масштаба энтальпии Мr разности (I’нач-Iвоз) соответствует отрезок АВ".

Расход тепла за цикл сушки находят по формуле (9). Далее, зная величину низшей теплоты сгорания топлива, можно легко найти количество топлива, которое надо сжечь в сушиле за 1 цикл сушки:

Вцикл=Qцикл/Qрнкг (м3).(13)

Среднечасовой расход топлива

b= Вцикл /tкг/ч (м3/ч),(14)

где t— время работы топки сушила, ч.

**Заключение**

В современных плавильных цехах высушивание различных материалов и изделий играет весьма важную роль, так как от него в значительной мере зависит качество металла или получаемых отливок. Это обусловлено тем, что сталеразливочные ковши, их стопорные устройства, литейные формы и стержни подвергаются сушке с целью удаления влаги, вводимой при их изготовлении вместе со связующими растворами и материалами. Кроме того, исходные сыпучие материалы для изготовления огнеупоров, литейных форм и стержней также предварительно высушивают.

Широкий ассортимент материалов, подвергаемых сушке, и изделии из них предопределяет большое разнообразие сушильных установок, которые выполняются работающими как непрерывно, так и периодически, топливными и энергетическими и т.д. Все эти совершенно различные в конструктивном отношении установки объединяются общностью осуществляемого с их помощью технологического процесса сушки.

**Список использованных источников**

1. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. М., Госэнергоиздат, 1956, 464 с. с ил.

2. Мастрюков Б. С. Теплотехнические расчеты промышленных печей. М., «Металлургия», 1972, 367 с. с ил.