

Модернизация горелочного оборудования для газообразного и пылеугольного топлива

РЕФЕРАТ. В статье изложен опыт фирмы Unitherm Cemcon по модернизации горелочного оборудования для сжигания газообразного и пылеугольного топлива во вращающихся печах, в частности, на цементных заводах стран СНГ.

Дано описание конструкций горелочных систем, разработанных фирмой, и показаны их преимущества.

Экономичность и надёжность работы цементных печей в очень большой степени зависят от совершенства эксплуатируемого горелочного оборудования и его правильной настройки. Как от конструкции горелки, так и от уровня её оснастки зависят производительность печи, удельный расход топлива,

качество клинкера, срок службы футеровки, количество вредных выбросов в атмосферу и т.д. Поэтому на цементных заводах всего мира уделяется очень большое внимание техническому уровню горелочной техники для вращающихся печей.

1. Модернизация горелочного оборудования на газообразном топливе

В журнале «Цемент и его применение» неоднократно приводилось описание конструкции газовых горелок для вращающихся печей системы M.A.S., производимых фирмой Unitherm Cemcon [1-3].

В течение последних лет в страны СНГ было поставлено уже более 15 горелок данной системы для сжигания природного газа. Накопленный опыт позволяет фирме Unitherm Cemcon как оценить уровень горелочной техники, эксплуатируемой в настоящее время на цементных заводах, так и предложить

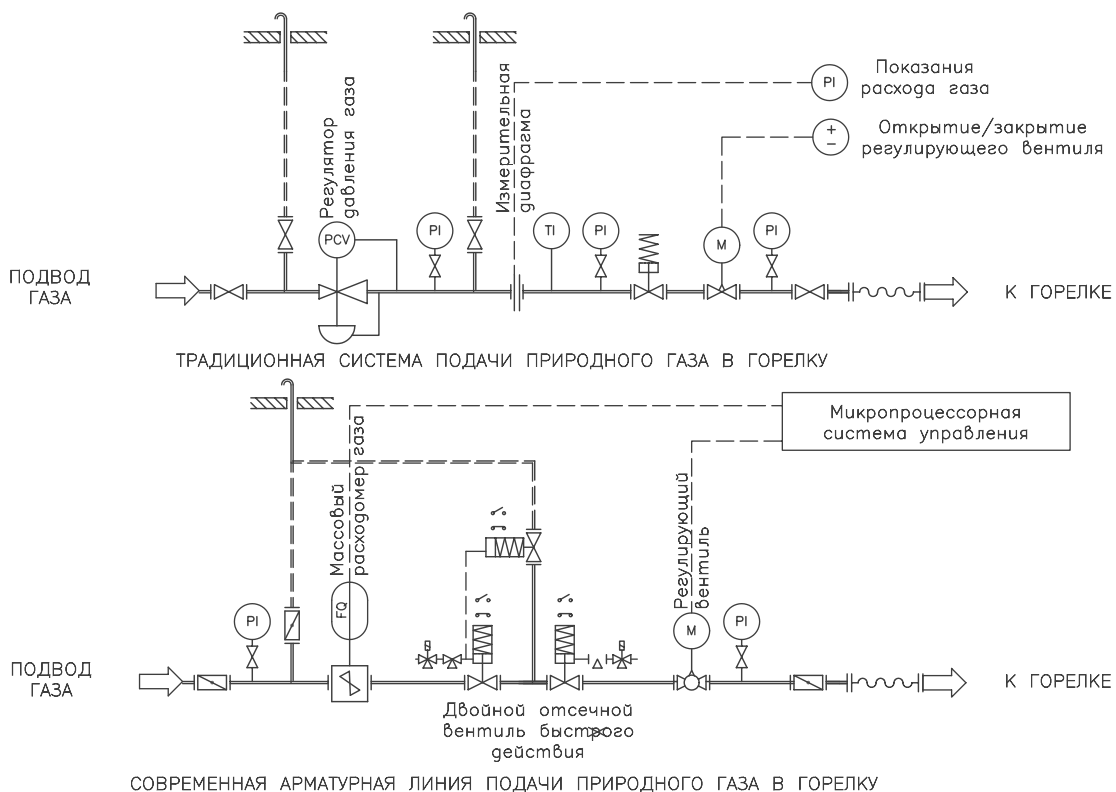


Рис. 1.

оптимальный, с нашей точки зрения, объём модернизации всей горелочной системы. Сама горелка является ее наиболее важным элементом, однако имеются и другие компоненты, от которых зависит эксплуатация печи в целом, удельный расход топлива, а также качество клинкера.

В целом горелочная система для сжигания газообразного топлива состоит из арматуры для подачи природного газа в горелку, самой горелки и средств автоматизации и контроля (регулирование тягодутьевого режима печи, прекрасно описанное в [4], оставим за рамками данной статьи).

На рис.1 приведена упрощённая схема газовой арматуры, установленной в настоящее время на большинстве цементных заводов стран СНГ. Как правило, обычная конфигурация состоит из регулятора давления газа, диафрагмы для измерения его расхода (с компенсацией или без компенсации по давлению и температуре), запорных шибберов быстрого срабатывания и регулирующего вентиля.

Самыми важными элементами управления являются регулирующий вентиль и измерительная диафрагма. Однако в качестве этой арматуры используется техника, которая уже 20 лет назад была устаревшей.

Так, например, расход газа поддерживается не в автоматическом режиме, а в ручном – машинистом печи с помощью регулирующего вентиля (шибера). Так как данный режим работы возможен только при постоянном давлении газа перед регулирующим вентилем, в системе устанавливается регулятор давления. Расход газа машинист контролирует по показаниям

измерительной диафрагмы, которые зачастую не пересчитаны на нормальные условия (0°C и атмосферное давление), так как в ряде случаев давление и температура газа, проходящего через диафрагму, не измеряются. Фактически основным устройством для поддержания расхода газа является регулятор давления, а не автоматический регулирующий вентиль. Вследствие этого существующие в магистральной линии газопровода синусоидальные колебания давления газа полностью не устраняются, а только демпфируются регулятором давления. Кроме того, наличие регулятора давления газа не обеспечивает постоянство давления газа непосредственно перед вентилем, так как между регулятором давления и вентилем расположен участок газопровода определённой длины, включающий газовую арматуру, и потери давления на этом участке не постоянны, а, в свою очередь, зависят от расхода и давления газа.

Таким образом, один из основных параметров для регулирования процесса обжига клинкера – количество тепловой энергии, выделяющейся в печи при сжигании топлива – является не строго контролируемым параметром, а приблизительной величиной.

Современная, поставляемая фирмой Unitherm Semcon, стандартная в Европе газовая арматурная линия также представлена в схематическом виде на рис.1.

В целом она состоит из запорной арматуры, двойного отсекающего вентиля быстрого действия с пневмоприводом, измерительного устройства расхода газа, регулирующего вентиля и микропроцессорной системы

управления. Если избыточное давление на входе составляет менее 0,4 МПа, то регулятор давления газа не устанавливается вообще. Расход газа регулируется микропроцессорной системой управления с помощью вентиля и измерительного устройства расхода газа. То есть машинист печи задаёт требуемый расход газа, который поддерживается далее в автоматическом режиме, вне зависимости от колебаний давления газа в подводящих газопроводах.

В качестве измерительного устройства в настоящее время используется турбинный расходомер или, что более предпочтительно, тепловой массовый расходомер, который измеряет расход газа в кг/с. Далее микропроцессором он пересчитывается в м³/ч. Основным недостатком турбинного расходомера является то, что этот очень чувствительный для условий цементного завода прибор при наличии самой малой загрязнённости потока газа выходит из строя и требует полной замены.

В качестве регулирующего лучше всего использовать шаровой сегментный вентиль, который имеет очень большой диапазон регулирования и позволяет при розжиге печи настроить минимальный расход газа, начиная практически с 100 м³/ч.

Для обеспечения безопасного использования природного газа служит двойной отсекающий вентиль быстрого действия с пневмоприводом, который при аварийных ситуациях прерывает подвод газа к горелке. Данная арматурная линия поставляется в полностью собранном виде на опорной раме и целиком готова к эксплуатации.

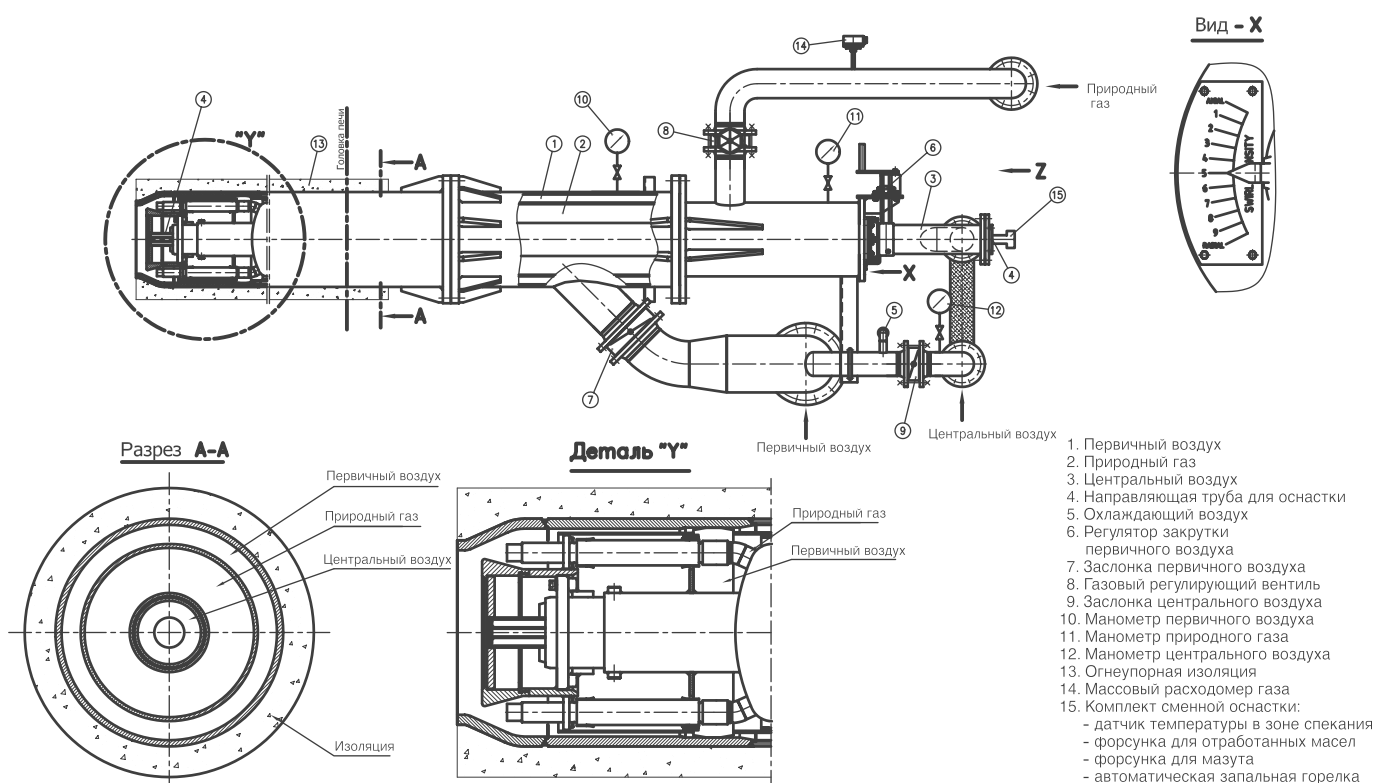


Рис. 2.

Как известно, модернизация горелочного оборудования, и в особенности для газового топлива, в России, к сожалению, имеет не только обычную технико-экономическую сторону, но также и «контрольно-согласовательную». А именно, мельчайшее изменение в существующей системе подвода газа перед горелкой (вплоть до установки дополнительного манометра) требует выполнения проекта, его экспертизы, согласований на многих уровнях и во всевозможных организациях, что требует больших затрат времени, нервов и средств. Данный объём работ требуется выполнять даже несмотря на то, что газовое оборудование, поставляемое фирмой Unitherm Setson в Россию – комплектные арматурные газовые станции, система управления, вспомогательное оборудование и т.д. – имеет сертификаты соответствия стандартам Российской Федерации и разрешение Ростехнадзора на применение. Понятно, что в этих условиях техническое руководство заводов очень неохотно идёт на модернизацию существующих систем регулирования тепловой мощности печи на газовом топливе, хотя они устарели уже несколько десятилетий назад. Поэтому Unitherm Setson разработал конструкцию горелки для газообразного топлива, где арматура для регулирования тепловой мощности печи (расхода газа) полностью встроена в горелку (рис. 2). На удлиненном газовом патрубке горелки устанавливаются компактный сегментный регулирующий вентиль, массовый расходомер газа и коробка микропроцессорного управления. Таким образом, абсолютно никаких изменений существующей системы подвода природного газа к горелке не требуется, как, естественно, и проведения каких-либо связанных с этим проектных работ. На данную конструкцию также имеются все требуемые сертификаты Росстандарта и Ростехнадзора.

Конструкция горелок фирмы Unitherm Setson выполнена таким образом, что горелку в любой момент можно дооснастить следующим вспомогательным стандартизированным в России оборудованием, которое устанавливается в свободный охлаждаемый центральный канал горелки:

1. Инфракрасный датчик измерения температуры в зоне спекания, который устанавливается внутри горелки на расстоянии 100 мм от сопла. Наличие такого датчика позволяет машинисту достичь большей стабильности режима работы печи и быстро реагировать на изменение условий обжига в зоне спекания.

2. Форсунка для распыления жидких топлив, в особенности отработанных масел или шламов при давлении 0,4-0,6 МПа, сжатым воздухом или паром.

3. Форсунка для распыления мазутов механическим способом при давлении 2,5-3,5 МПа.

4. Форсунка для распыления твёрдых измельчённых топлив из отходов.

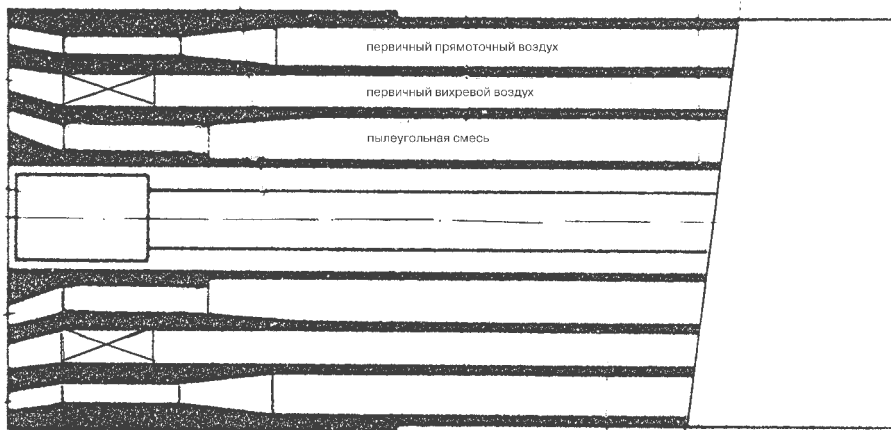


Рис. 3. Горелка второго поколения для пылеугольного топлива

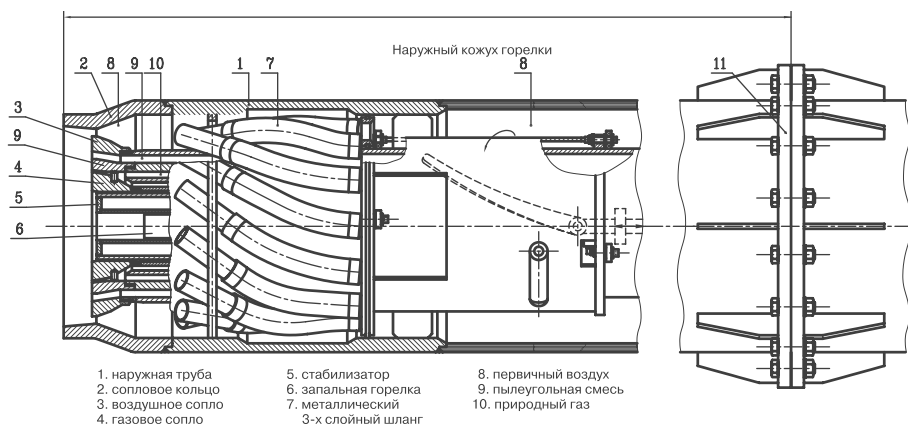


Рис. 4. Сопловой аппарат горелки M.A.S./-КО.ЕG.X

5. Запальная горелка с комплектом арматуры и коробкой управления для автоматического розжига основного топлива. Данная запальная горелка должна быть в работе до тех пор, пока температура стенки печи не превысит 750°C, что обеспечивает гарантированное воспламенение основного потока газа. Запальная горелка имеет встроенный датчик наличия пламени, то есть осуществляется постоянный автоматический контроль воспламенения природного газа.

Таким образом, модернизацию горелочного оборудования можно выполнить в короткие сроки и с существенно меньшими затратами, так как все основные компоненты для управления тепловой нагрузкой печи уже встроены в саму горелку.

2. Модернизация горелочного оборудования на пылеугольном топливе

2.1. Горелочные системы первого поколения для пылеугольного топлива

В прошлом, 30-40 лет назад, горелки для пылеугольного топлива представляли собой одноканальную трубу, по которой пылевидное топливо в смеси с транспортным (первичным) воздухом подавалось в печь, при этом скорость

истечения пылеугольной смеси из сопла горелки составляла 50-75 м/с. Конструкция таких горелок не позволяет регулировать форму пламени (единственный способ – изменение положения горелки в печи) и управлять процессом обжига клинкера. Данная максимально простая конструкция объяснялась, в частности, использованием цементными заводами открытой системы помола угольного топлива. То есть измельчённый в мельнице уголь подавался транспортирующим воздухом непосредственно в печь. Так как подогретый транспортный воздух служит в этих системах также теплоносителем для подсушки угля и обеспечивает выгрузку угольной пыли из мельницы, его количество очень велико – до 30-40% от общего количества воздуха, идущего через печь, и соответственно содержание угольной пыли в транспортном воздухе составляет 0,3-1,0 кг на 1 кг воздуха. Поскольку холодный транспортный воздух из холодильника, то, естественно, увеличивается удельный расход топлива и снижается производительность печи.

Открытые системы в целом практически не позволяли обеспечить стабильное, экономичное производство клинкера и были заменены на полузамкнутые или замкнутые системы помола угля, в которых угольная пыль после

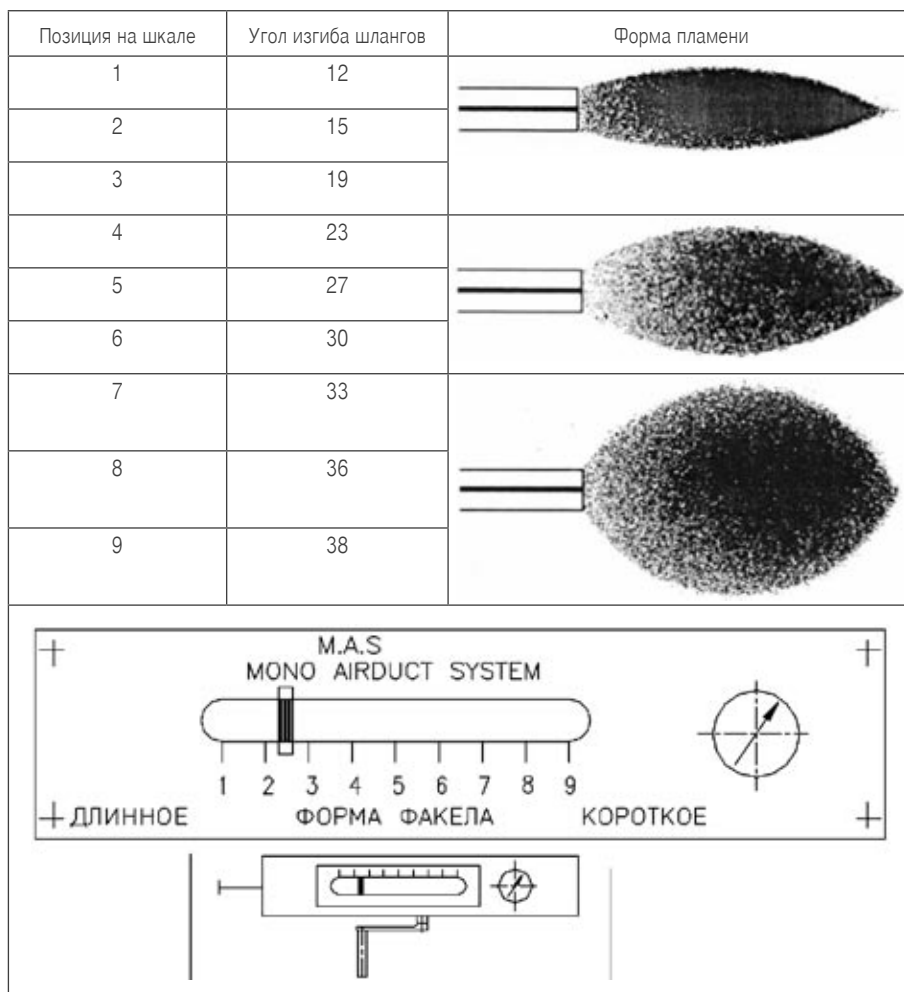


Рис. 5. Регулировка формы факела горелки M.A.S.

мельницы подаётся в угольный бункер, а отфильтрованный транспортный воздух, как правило, отводится в атмосферу. Из бункера угольная пыль подаётся через дозирующее устройство в трубопровод транспортного воздуха и далее в горелку.

2.2. Дальнейшее развитие горелочных систем для пылеугольного топлива

Необходимость увеличения производительности вращающейся печи, снижения удельного расхода топлива и эффективного управления процессом обжига клинкера привели к созданию горелок второго поколения. В них осуществляется отдельная подача в горелку пылеугольной смеси – транспортным воздухом после дозирующего устройства – и первичного воздуха, который служит для управления формой факела и обеспечивает оптимальное сгорание пылевидного твёрдого топлива.

Это позволило увеличить содержание угольной пыли в транспортном воздухе до 3,5-6,0 кг на 1 кг воздуха, то есть уменьшить количество транспортного воздуха в 5-10 раз. Количество первичного воздуха, подаваемого в горелку отдельно от пылеугольной смеси, составляет при этом 6-10% от общего количества воздуха, идущего через печь. Стремление максимально снизить расход

холодного первичного воздуха привело к увеличению давления воздуха перед горелкой до 20-40 кПа.

Первичный воздух, поступающий в горелку, служит для:

- быстрого воспламенения пылеугольного топлива,
- равномерного смешения топлива с вторичным воздухом и с продуктами сгорания,
- обеспечения полного сгорания топлива в атмосфере печи в пределах зоны спекания,
- достижения максимальной регулируемости формы факела,
- высокой стабильности факела вне зависимости от его формы и мощности,
- снижения выброса вредных веществ,
- надёжного охлаждения горелки для увеличения срока её службы.

Таким образом, энергия первичного воздуха является очень важным параметром горелки и вращающейся печи. Энергию первичного воздуха для горелок вращающихся печей принято оценивать по его импульсу (Н), определяемому как массовый расход (кг/с), умноженный на скорость истечения из сопла (м/с).

Одним из показателей работы горелочных устройств является величина удельного импульса (Н/МВт), представляющего собой отношение импульса (Н) к тепловой мощности горелки (МВт).

Технические центры ряда цементных концернов рекомендуют для твёрдого топлива не допускать снижения удельного импульса менее 7-8 Н/МВт. Следует отметить, что чем более совершенна конструкция горелки, тем меньший импульс первичного воздуха необходим для эффективного сгорания топлива и регулирования формы пламени.

Естественно, для цементных заводов, особенно с печами по мокрому способу, одним из важнейших факторов также является простота управления формой факела, то есть максимально быстрая настройка новой формы факела под изменившиеся условия обжига.

Горелки второго поколения имели и имеют простую двухканальную систему подачи первичного воздуха в факел. На рис. 3 схематично представлен сопловой аппарат горелок данной системы, который используется в тех или иных вариантах многими фирмами до настоящего времени. Фирма Unitherm Semcon также производила до 1990 г. горелки данной системы.

Один из каналов таких горелок оснащен завихрителем (вихревой канал), а другой нет (прямоточный канал). Путём распределения первичного воздуха по этим каналам достигается удлинение факела (меньшая закрутка потока первичного воздуха) или укорачивание (большая закрутка потока первичного воздуха). Распределение первичного воздуха по каналам осуществляется или заглушками, или путём изменения площадей выходного сечения соответствующих сопел с помощью осевого перемещения внутренней трубы канала с соплом.

Опыт эксплуатации горелок данной системы выявил, однако, ряд их недостатков:

- сложность управления формой факела вследствие наличия большого количества средств управления - двух заглушек и устройств для осевого перемещения каналов;
- узкий диапазон регулирования формы пламени, так как изменение степени закрутки первичного воздуха при перераспределении воздуха весьма незначительно;
- подача первичного воздуха по двум концентрическим каналам приводит к повышенным потерям его давления, то есть к снижению скорости истечения первичного воздуха из сопел и потерям энергии, крайне необходимой для его смешения с топливом и с атмосферой печи;
- истечение первичного воздуха в форме концентрических разнонаправленных струй, в результате столкновения которых образуется новая струя, приводит к потерям кинетической энергии первичного воздуха, при этом снижается интенсивность горения, уменьшается зона рециркуляции горячих газов в центре пламени и, тем самым, замедляется воспламенение топлива;
- при регулировании формы факела путём распределения воздуха по двум каналам неизбежно снижается или общий расход первичного воздуха через горелку, или скорость

НАУКА И ПРОИЗВОДСТВО

его истечения через аксиальное/радиальное сопло, то есть снижается энергия (импульс) первичного воздуха в пространстве печи, что приводит к уменьшению стабильности факела и снижению эффективности горения топлива.

2.3. Горелочная система M.A.S. для пылеугольного топлива

С целью устранения вышеперечисленных недостатков фирма Unitherm Cemcon в конце 80-х гг. приняла решение разработать принципиально новую конструкцию горелки. Основными технологическими задачами, поставленными при разработке этой конструкции, являлись следующие:

1) достичь максимально простой регулировки формы пламени, настройка новой формы должна осуществляться в течение нескольких секунд,

2) обеспечить регулировку формы пламени без изменения энергии (импульса) струи первичного воздуха, то есть расход первичного воздуха и скорость его истечения должны оставаться постоянными при любой форме пламени,

3) интенсифицировать сгорание топлива в зоне спекания и при этом снизить тепловую нагрузку на футеровку печи путем устранения пиков температуры вследствие интенсивной рециркуляции продуктов сгорания в центре факела,

4) значительно увеличить диапазон регулирования формы пламени,

5) обеспечить надёжное охлаждение наружного кожуха горелки и соплового аппарата при любой форме пламени.

В результате 3-х летних проектных работ удалось найти, наверно, практически единственное конструктивное решение, позволяющее достичь заданной цели – систему M.A.S. Данная горелка (рис. 4 - 6), не имеющая мировых аналогов, была запатентована фирмой Unitherm Cemcon в 1991 г.

В горелке M.A.S. сопловой аппарат для первичного воздуха представляет собой систему гибких жаростойких металлических шлангов (12 - 15 штук), встроены в канал первичного воздуха.

Таких образом, первичный воздух поступает в наружный канал горелки и далее через металлические шланги со специальными соплами – в пространство печи в виде отдельных дискретных струй. Металлические шланги установлены таким образом, что их можно одновременно изгибать в тангенциальном направлении относительно оси горелки с помощью устройства управления, установленного на холодном конце горелки. Возможный угол изгиба составляет от 0° (параллельно оси горелки) до 40°.

1. Устройство управления – это только одна рукоятка ручного привода, посредством которой осуществляется одновременный изгиб гибких шлангов, и шкала, показывающая, в каком положении находятся шланги.

Таким образом изменение формы пламени осуществляется в течение нескольких секунд с помощью только одного органа управления. Данное устройство также легко автоматизируется для дистанционного управления формой пламени с помощью электропривода. Первая горелка в России с дистанционным управлением формой пламени поставляется фирмой Unitherm Cemcon Сухолюжскому цементному заводу в конце 2004 г., общий объём поставок горелок M.A.S. для вращающихся печей мокрого способа превысил 25 единиц.

2. Так как при различных формах факела количество первичного воздуха и скорость его истечения из сопел шлангов остаются постоянными, то, естественно, энергия и импульс первичного воздуха также остаются постоянными и максимальными для установленного вентилятора первичного воздуха, что важно для увеличения как эффективности горения, так и стабильности пламени.

из топлива, горячего вторичного воздуха и рециркулирующих продуктов сгорания. Продукты сгорания, возвращаемые в пламя, не участвуют в горении и снижают пиковую температуру в ядре пламени. То есть, несмотря на высокую интенсивность горения, факел имеет более равномерную температуру по длине, без локальных пиков, что благоприятно действует на срок службы огнеупорной футеровки печи.

4. В традиционных горелках регулирование формы пламени достигается изменением степени закрутки суммарного потока первичного воздуха. В теории закрученных струй для характеристики степени закрутки потока используется коэффициент закрутки струи – K_z , отражающий соотношение тангенциального и прямогочного компонентов импульса струи первичного воздуха. Для горелок данного типа коэффициент закрутки K_z находится в пределах от 0,05 до 0,35, что позволяет изменять длину факела в пределах 10%.



Рис. 6. Сопловой аппарат горелки M.A.S.

3. Одной из важнейших особенностей системы является истечение первичного воздуха в виде отдельных струй, в отличие от горелок предыдущего поколения, где имеет место концентрическая струя первичного воздуха. Как известно из теории свободных струй и теории горения, многоструйное истечение резко интенсифицирует процессы смешения сред в свободном пространстве, то есть интенсифицирует горение. Простым наглядным подтверждением этого является обычная газовая конфорка. При снятии с нее крышки, имеющей ряд отверстий, пламя многократно удлиняется и становится очень ярким. Если не произошёл обрыв пламени, то потребление газа с одноструйной конфоркой будет выше, чем первоначально с многоструйной. Улучшенное смешение сред при использовании многоструйных систем объясняется тем, что такая система засасывает в себя на участке одинаковой длины гораздо больше окружающей массы, чем одноструйная. В условиях вращающейся печи засасываемая струями масса состоит

В горелках M.A.S. регулирование формы факела осуществляется на абсолютно другом принципе. А именно, отдельные струи первичного воздуха, истекающие из соплового аппарата горелки, не имеют никакой закрутки – они прямоточны при любом изгибе шлангов, и теория закрученных струй к ним неприменима. Если шланги установлены параллельно оси горелки без изгиба, то струи первичного воздуха, выходя из горелки, сливаются друг с другом на расстоянии примерно 300 - 500 мм от сопел. При максимальном изгибе шлангов струи первичного воздуха истекают под углом 40 - 45° в тангенциальном направлении к оси горелки. При этом струи расходятся друг от друга и на всей длине остаются изолированными, дискретными. Из теории дискретных струй известно, что при разделении одной струи на N струй их длина (и соответственно длина зоны смешения) уменьшается пропорционально корню из N. Так как количество струй в горелке M.A.S. составляет 12 - 15, их длина, и соответственно длина зоны смешения топлива и горелочного воздуха, укорачивается в 3,5 раза,

что позволяет уменьшить длину факела на 30–40% по сравнению с осепараллельным вариантом истекания. Такого диапазона регулирования не достигает ни одна горелка другой конструкции!

5. Весьма важно также то, что в горелках системы M.A.S. имеется только один канал для подачи первичного воздуха, прилегающий к наружному кожуху. Таким образом, при любой форме пламени весь поток первичного воздуха омывает изнутри наружный кожух и надёжно охлаждает его, что позволяет полностью устранить возможность его прожога.

3. Модернизация горелочных систем для пылеугольного топлива в странах СНГ

Возвращаясь к системам сжигания пылеугольного топлива, используемым на территории бывшего СССР, следует отметить, что

Оценить минимальный уровень экономии топлива и увеличение производительности печи при внедрении на печах мокрого способа современной горелочной техники системы M.A.S. с подачей в горелку высококонцентрированной пылеугольной смеси позволяют номограммы (рис. 7. и 8.). Чтобы воспользоваться ими, нужно найти на оси X существующий расход первичного, транспортного воздуха и на оси Y – величину экономии топлива/увеличение производительности печи в % для той или иной печи.

При расчёте минимальной экономии топлива для ряда типовых печей принято во внимание следующее:

- экономия тепла вследствие уменьшения расхода холодного первичного (транспортного) воздуха и соответствующего увеличения доли горячего вторичного воздуха, поступающего в печь;
- вследствие увеличения доли вторичного воздуха, а также более эффективного

зоны спекания, целенаправленно воздействовать на обмазку печи для увеличения срока её службы;

- улучшение качества клинкера вследствие возможности настройки оптимальной формы пламени при более быстром охлаждении клинкера;
- снижение выбросов оксидов азота NO_x;
- в горелке имеется свободный центральный канал, в котором в любой момент может быть установлена распыляющая форсунка для сжигания мазутов, солярного или дизельного топлива, а также различных жидких отходов. Как известно, сушка новой футеровки со строгим соблюдением определенного температурного режима позволяет значительно увеличить срок её службы. При использовании специальной форсунки для распыления жидкого топлива сжатым воздухом или паром под давлением бат легко обеспечивается соблюдение такого режима;

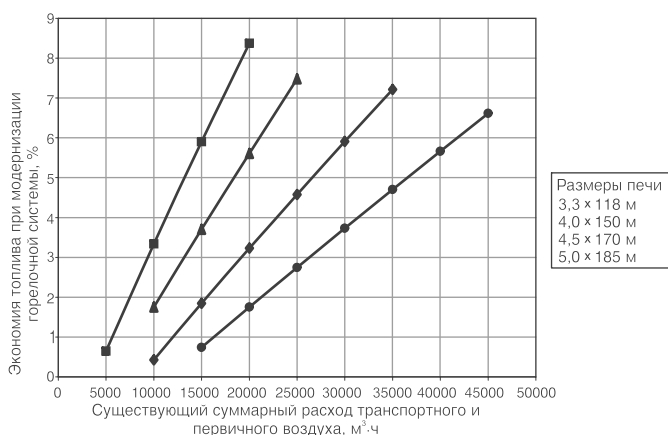


Рис. 7. Экономия топлива для вращающихся печей мокрого способа при установке горелочных систем M.A.S.

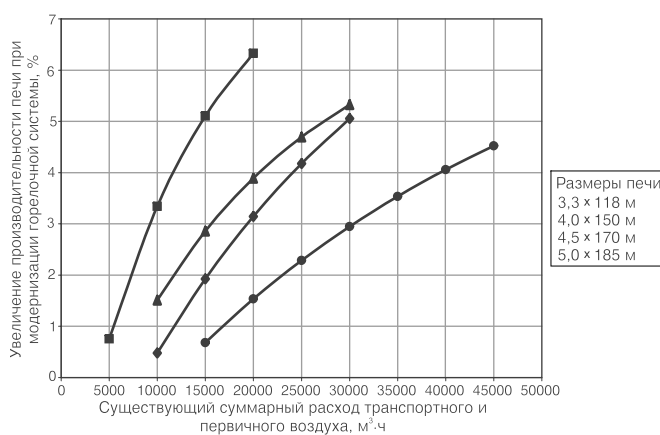


Рис. 8. Увеличение производительности вращающихся печей мокрого способа при установке горелочных систем M.A.S.

до сих пор в основном используются горелочные системы первого поколения, где содержание пыли в транспортном воздухе составляет: 0,3–1,0 кг на 1 кг воздуха, несмотря на то, что между угольной мельницей и горелкой, как правило, установлен промежуточный угольный бункер. Между тем, данные системы могут быть сравнительно легко модернизированы. Для минимальной модернизации требуется установить после дозирующего устройства:

1. современный ячейковый питатель для подачи угольной пыли в трубопровод повышенного давления;
2. новую воздухоудувку для транспортного воздуха;
3. новую горелку с вентилятором первичного воздуха. Необходимо также проложить новый углеродный провод меньшего диаметра.

Модернизация горелочной системы для пылеугольного топлива в вышеизложенном объёме была выполнена фирмой Unitherm Semcon для ОАО «Цесла» на печи производительностью 1200 т/сут.

сжигания топлива, повышается температура факела, т.е. растёт температурный уровень в зоне спекания, что позволяет увеличить производительность печи (при наличии резерва мощности тягового вентилятора, нормальной подготовки материала в цепной зоне и сохранении к.п.д. холодильника) и снизить удельные потери тепла при производстве клинкера.

При расчёте экономии твёрдого топлива не принято во внимание дополнительное снижение его расхода вследствие снижения величины избытка воздуха, необходимого для полного сгорания топлива, а также того, что его полное сгорание обеспечивается в пределах зоны спекания.

Кроме экономии топлива и увеличения производительности печи, установка современных горелок системы M.A.S. также обеспечивает следующие преимущества:

- лёгкое регулирование формы пламени в широком диапазоне, что делает возможным уменьшить количество «тихих ходов» печи, устранять кольца в обресе печи и в начале

– возможность использования более дешёвого топлива, например низкокачественных углей с малым содержанием летучих или отходов угольной промышленности.

Большой опыт фирмы Unitherm Semcon по оснащению цементных заводов стран СНГ современной горелочной техникой позволяет утверждать, что инвестиции на модернизацию горелок для вращающихся печей окупаются в весьма короткий период.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов-Вагнер А. Конструктивное развитие газовых горелок для вращающихся печей // Цемент и его применение. 1997. № 3. С. 7–11.
2. Михайлов-Вагнер А. Результаты обследования работы печи с новой горелкой фирмы «UNITHERM-Semcon» на Иваново-Франковском цементно-шиферном комбинате // Цемент и его применение. 1998. № 2. С. 28–29.
3. Михайлов-Вагнер А. Влияние горелочного устройства на технико-экономические показатели вращающихся печей // Цемент и его применение. 1999. № 2. С. 15–19.
4. Классен В.К. Основные принципы и способы управления цементной вращающейся печью // Цемент и его применение. 2004. № 2. С. 39–42.