

ОПТИМИЗАЦИЯ СЖИГАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА В ЦЕМЕНТНЫХ ПЕЧАХ

alexxy@mail.ru

Коновалов В.М., канд. тех. наук, доц.,

Новоселов А.Г., канд. тех. наук, доц.,

Литовченко А.В., мл. науч. сотр.,

Гончаров А.А., мл. науч. сотр.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Аннотация. При разработке способов интенсификации и оптимизации теплотехнологических процессов технологии производства цемента развиты представления об эксергетическом подходе к использованию альтернативного топлива в технологии мокрого и сухого способов производства цемента. Расчетными данными и промышленными испытаниями установлено оптимальное количество подаваемого в горелку газообразного топлива и древесной щепы влажностью 30%, используемой в качестве альтернативного топлива. Количество щепы, сжигаемой в печи, составляет 4 т/ч на 10000 м³/ч газообразного топлива.

Ключевые слова. Альтернативное топливо, инжекционно-диффузионная горелка, экономия топлива, КПД холодильника.

Технологические условия образования цементного клинкера в зоне спекания вращающихся печей предъявляют определенные требования к режиму сжигания топлива [1, 2]. Известно, что зона спекания клинкера совмещается с зоной горения топлива. Соответствие параметров сжигания топлива параметрам спекания сырьевой смеси является наиболее важным условием процесса обжига клинкера во вращающихся печах.

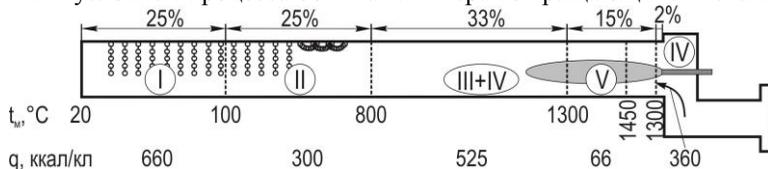


Рисунок 1 – Технологические зоны в печи мокрого способа производства и теплопотребление по зонам: I – сушки; II – подогрева; III – декарбонизации; IV – экзотермических реакций; V – спекания; VI – охлаждения

Из расчетов теплового баланса вращающейся печи (рис. 1) следует, что при мокром способе производства с удельным расходом теплоты 5,4...6,5 МДж/кг клинкера 3,5...4,5% ее расходуется на нагревание материала до температуры спекания и около 6% на теплопотери корпусом печи на участке зоны спекания. Теплоотдача факела на этом участке печи не превышает 10% от общей его теплоты.

Малая отдача теплоты материалу и высокая температура обеспечивают стабильность процесса горения.

К особенностям сжигания топлива во вращающихся печах следует отнести требования к положению зоны горения, чтобы температура выходящего из печи клинкера не превышала 1200...1250°C, а температура корпуса печи – 250...300°C.

Определяющим фактором эффективности сжигания топлива является температура, которая определяет скорость протекания химических процессов при синтезе портландцементного клинкера, подчиняющихся экспоненциальной зависимости Аррениуса. Именно потому, что температура факела в печах сухого способа на 100...200°C выше, чем на печах мокрого способа, стало возможным повысить их производительность при относительно малых размерах агрегатов.

Рассматривая физические условия теплообмена в зоне спекания, следует учитывать, что более 90% тепла передается излучением факела. Теплообмен излучением подчиняется известному закону Стефана-Больцмана:

$$Q_{\varepsilon} = 5,67 \cdot \varepsilon_i \left[\varepsilon_{\delta} \left(\frac{\dot{Q}_{\delta}}{100} \right)^4 - \lambda_{\delta} \left(\frac{\dot{Q}_i}{100} \right)^4 \right],$$

где $Q_{\text{л}}$ – лучистый теплообмен от факела к материалу; 5,67 – постоянная Стефана-Больцмана, излучение абсолютно черного тела; $\varepsilon_{\text{м}}$, $\varepsilon_{\text{ф}}$ – степень черноты факела и материала; $T_{\text{ф}}$, $T_{\text{м}}$ – температура факела и материала, К; $a_{\text{ф}}$ – поглощающая способность факела.

С повышением температуры факела на 100°C в интервале температуры 1550...1650°C, лучистый теплообмен возрастает на 23%. Однако повышение температуры в печи ограничивается стойкостью огнеупорной футеровки и условиями синтеза клинкера [3]. Интенсифицировать процесс теплообмена можно и при пониженной температуре факела, но при этом необходимо создать условия, при которых увеличится степень его черноты факела $\varepsilon_{\text{ф}}$ ($\varepsilon_{\text{ф}}$ – может изменяться от 0,25 до 0,7). Создание в печи рациональных условий сжигания топлива имеет важное значение и во многом определяется конструкцией горелочных устройств.

Все процессы сжигания имеют следующие стадии:

Смешение → *Воспламенение* → *Химическая реакция* → *Рассеивание продуктов сгорания*.

Скорость горения зависит от скорости вышеуказанных стадий. В большинстве промышленных систем сжигания, смешения это самая медленная стадия, в то время как другие стадии быстрые. Скорость и полнота процесса сжигания контролируются скоростью и полнотой топливно-воздушного смешения, т.е. скоростью подвода окислителя к топливу и интенсивностью их смешения, и определяется критерием Пекле:

$$Pe = Pr \cdot Re = 0,7 \cdot Re$$

где Pr – критерий Прандтля, критерий Рейнольдса: $Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$, d – определяющий диаметр (диаметр печи); w – скорость газового потока; ν – кинематическая вязкость газов.

С повышением скорости вылета газа из горелки интенсивность смешения и горения возрастает. С повышением температуры вторичного воздуха скорость смешения и горения замедляется, поскольку значительно возрастает вязкость воздуха.

Конфигурация факела определяется точкой воспламенения. Раннее воспламенение в диффузионных горелках ухудшает подвод окислителя и несколько удлиняет факел, который должен быть оптимальной структуры.

Как показывает практика исследования процесса сжигания природного газа во вращающихся печах при средних давлениях газа от 0,4 бар и скоростях истечения 300...400 м/с из одноканальных диффузионных горелок малого диаметра газ интенсивно сгорает без химического недожога при значениях коэффициента избытка воздуха $\alpha > 1,05$.

Однако применение таких горелок имеет существенный недостаток, заключающийся в наличии в оси факела высокой концентрации топлива. Это определяет формирование в печи пиковой температурной нагрузки на корпус в зависимости от режима работы горелки (давление газа, положение завихрителя, коэффициент избытка воздуха в печи и др.): на «ближней», «средней» или «дальней» зоне обжига, и вынуждает использовать приемы, снижающие интенсивность горения топлива (например, увеличивая наклон горелки к материалу), что, в конечном счете, снижает эффективность теплообмена.

Для интенсификации сжигания газовой смеси следует организовать развитое и устойчивое зажигание смеси путем дробления потока на

мелкие струи и создания устойчивых очагов зажигания. Развитое зажигание и развитая поверхность горения уменьшает инертный объем факела и увеличивает тепловое напряжение его объема. Можно считать целесообразным переход к щелевым горелкам, где развитое зажигание осуществляется увеличением периметра воспламенения. В этом случае факел принимает форму полого расходящегося конуса, в котором зажигание осуществляется как по периферии горелки, так и по внутренней поверхности факела благодаря интенсивной рециркуляции. Продукты горения захватываются из пламени и воспламеняют поступающее топливо (внутренняя рециркуляционная зона). Развитое зажигание и развитая поверхность горения уменьшает инертный объем факела и увеличивает тепловое напряжение его объема.

Достижение хорошей стабильности факела с природным газом действительно трудно, потому что он имеет высокую температуру воспламенения, узкие пределы воспламенения, и низкую скорость распространения пламени. Для интенсификации сжигания газа и других видов топлива применяют подачу первичного воздуха непосредственно через горелку. И если в печах сухого способа использование первичного воздуха объясняется необходимостью интенсификации горения топлива, то на печах мокрого способа производства этот прием вызывает серьезные возражения вследствие снижения эффективности работы клинкерного ходильника [4, 5].

В последнее время иностранные фирмы (Pillard, Unitherm и др.) предлагают многоканальные горелки, позволяющие сжигать различные виды топлива, имеющие значительные размеры сопловой части. Однако следует учитывать, что сжигание газа даже с высоким импульсом струи топлива (8...9 Н/МВт) на горелках большего диаметра с кольцевым зазором ведет к резкому затуханию струи. Вследствие чего формируется факел с очень близкой точкой воспламенения при относительно малом вовлечении в струю вторичного воздуха. Факел получается «вялым», и при поступлении в зону спекания слабо подогретого материала, может перебрасываться в подготовительные зоны.

Кафедрой ТЦКМ совместно с тульской фирмой ООО ПФ «АЯН», разработано горелочное устройство – ГИД (горелка инжекционно-диффузионная), хорошо зарекомендовавшее себя на печах мокрого и сухого способов производства цемента. Отличительной особенностью модификаций этих горелок является наличие центрального канала, по которому инжектируется первичный воздух за счет разрежения создаваемого газовым потоком за плохо обтекаемым телом, роль которого выполняет дроссель, сделанный в форме обратного конуса. Горелка имеет

широкий диапазон регулирования и обладает высокой устойчивостью зажигания (рис. 2).

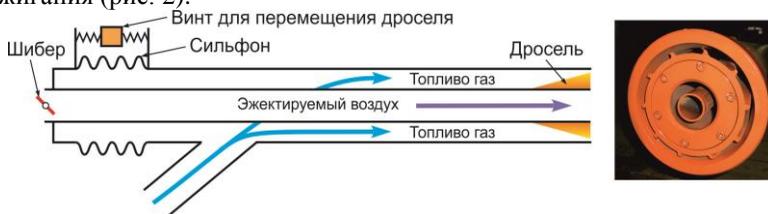


Рисунок 2 – Принципиальная схема горелки ГИД

Наличие свободного центрального канала делает возможным сжигать в печи другие виды топлива. В настоящее время ведется работа по оптимизации конструкции дроселя для совместного сжигания газа и различных видов твердого и жидкого топлива в определенном их сочетании, что представляет весьма сложную задачу с учетом различных температур воспламенения, калорийности и скорости горения составляющих комбинированного топлива.

Таблица 1

Состав и характеристика древесной щепы при разной влажности, %

	Влажность древесной щепы, %			
	20	30	40	50
Состав щепы на рабочую массу, %				
C ^p	40,8	35,7	30,6	25,5
H ^p	4,9	4,3	3,7	3,1
O ^p	33,8	29,6	25,4	21,1
N ^p	0,5	0,4	0,3	0,3
Σ	80	70	60	50
Q _н ⁱ , кДж/ккал	14698/3510	12558/2999	10418/2488	8290/1980
Воздух на горение, м ³ /кг	3,800	3,328	2,855	2,386
Объем продуктов горения, м ³ /кг				
V _{CO₂}	0,759	0,664	0,569	0,474
V _{H₂O}	0,797	0,854	0,910	0,967
V _{N₂}	3,006	2,632	2,258	1,887
Σ	4,562	4,15	3,737	3,328
Жаропроизводительность, °C	1884	1773	1641	1489

Для оценки эффективности использования альтернативного топлива, в качестве которого предполагается использование переработанной в щепу древесины, проведем расчет жаропроизводительности и макси-

мальной температуры факела при его использовании с различной влажностью (таблица 1).

Состав древесины: $C^r = 51\%$, $H^r = 6,1\%$, $O^r = 42,3\%$, $N^r = 0,6\%$, $Q_n^r = 4530$ ккал/кг, $t = 2010^\circ\text{C}$.

Расчеты, показывают, что с повышением влажности используемой древесной щепы, резко снижается температура горения. А при влажности 50% температура факела будет сравнима с температурой, необходимой для получения клинкера – 1450°C (рис. 3.).

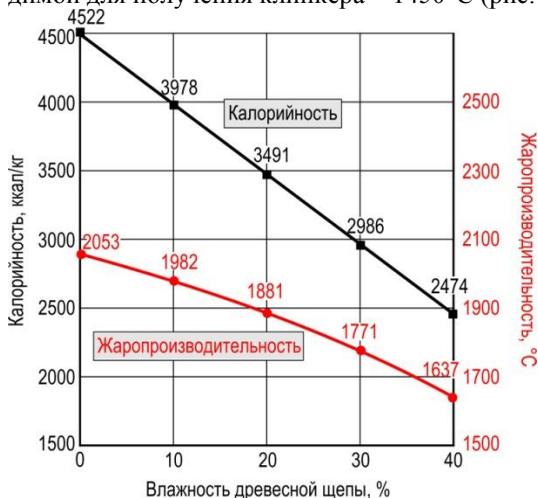


Рисунок 3 – Снижение калорийности и жаропродуктивности щепы в зависимости от влажности

Калорийность древесины не превышает 1980 ккал/кг при влажности 50% и 3510 ккал/кг при влажности 20%. Следует также отметить, что влажности 20% древесина достигает в условиях естественного хранения в течении 2 лет. В испытаниях использовалась древесина с влажностью 32...35%.

На рисунке 4 изображены расчетные температуры факела в зависимости от

влажности древесной щепы и ее количества, подаваемого совместно с газом. При абсолютно сухой древесине температура, которую может развить факел, сопоставима с газовым факелом. Но с повышением влажности температура факела резко снижается. И в зависимости от влажности щепы следует ограничивать ее расход.

Для нормальных условий теплообмена температура факела в топном пространстве печи должна находиться в пределах 1750°C .

Снижение температуры факела на 30°C уменьшит лучистый теплообмен на 6%, что в конечном итоге потребует увеличения времени нахождения материала в зоне спекания и снижение производительности печи. Это закономерный процесс при использовании низкокалорийного

топлива. В противном случае, нужно увеличивать суммарный расход тепла.

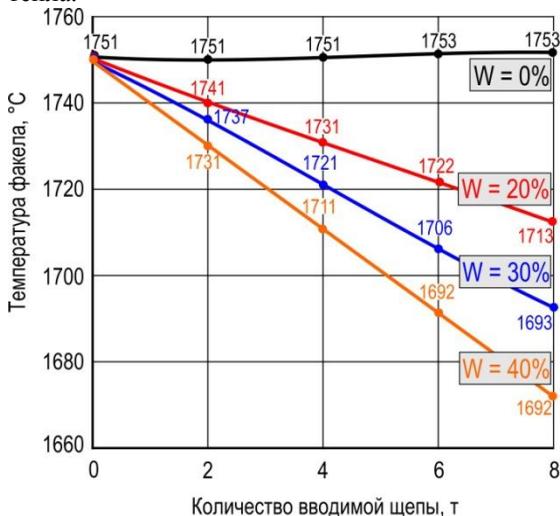


Рисунок 4 – Влияние доли вводимой щепы на температуру факела с учетом ее влажности

Чтобы определиться с количеством щепы, учитывая снижение температуры факела, нужно на графике провести горизонтальную линию, например, от температуры 1720°C, и на пересечении с наклонной линией определенной влажности, внизу, по шкале «количество вводимой щепы», определить рекомендуемое количество альтернативно-

го топлива в т/час (при важности 30%, эта величина составит около 4 т/час).

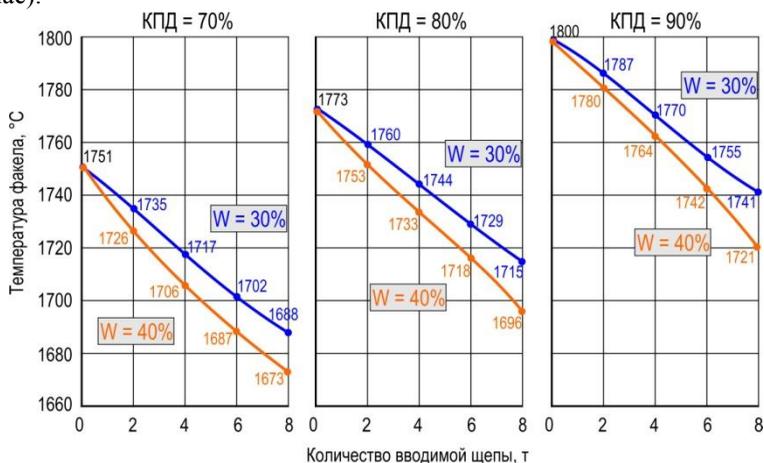


Рис. 7. Возможность увеличения максимального количества вводимой щепы с повышением КПД холодильника

Необходимо также уделять большое внимание работе клинкерного холодильника, поскольку от его работы зависит и температура, развиваемая при горении топлива. На рисунке 5 приведены расчетные зависимости температуры факела от расхода древесной щепы и теплового КПД холодильника. Из приведенных зависимостей видно, что при одной и той же влажности щепы ее расход может быть увеличен вдвое при изменении КПД холодильника с 70 до 90%.

Полученные аналитические зависимости позволят целенаправленно определить рациональное соотношение расходов газообразного и твердого топлива, для создания необходимых условий теплообмена в зоне обжига вращающейся печи. Промышленными испытаниями установлено, что количество вводимой щепы при сжигании ее в качестве альтернативного топлива составляет 4 т/ч на каждые 10000 м³/ч газообразного топлива.

Выводы

1. Установлены закономерности совместного использования традиционного и альтернативного топлива, определяющие работоспособность факела во вращающихся печах.

2. Количество древесной щепы вводимой в горелку вращающейся печи определяется ее калорийностью. С повышением влажности древесной щепы от 0 до 50% калорийность снижается почти в 2,3 раза.

3. Промышленными испытаниями установлено, что оптимальное количество вводимой щепы с влажностью 32...35% при сжигании ее в качестве альтернативного топлива составляет 4 т/ч на каждые 10000 м³/ч газообразного топлива.

4. При повышении КПД колосникового холодильника с 70 до 90% возможно вдвое увеличить количество вводимой щепы при постоянной ее влажности.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08031 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента. Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. 308 с.
2. Klassen V.K., Novosyolov A.G., Borisov I.N., Konovalov V.M. Management of clinker burning in the rotary kiln, aimed to improve the quality of cement and fuel economy // Middle-East Journal of Scientific

Research. 2013. №15 (12). PP. 1871-1876. URL:
[http://idosi.org/mejsr/mejsr15\(12\)13/42.pdf](http://idosi.org/mejsr/mejsr15(12)13/42.pdf).

3. Классен В.К., Коновалов В.М., Новоселов А.Г. Повышение стойкости футеровки в цементных вращающихся печах рациональным сжиганием топлива // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. №10. С. 17-20.
4. Трубаев П.А., Перескок С.А., Хутяев Ю.К. Интенсификация теплообмена в колосниковом клинкерном холодильнике // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2005. №10. С. 294-299.
5. Новоселов А.Г., Классен В.К. Исследование процесса тепломассообмена в колосниковом холодильнике // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. №2. С. 60-63.