

УДК 621.1

Беспламенное окисление. Горение с низким образованием NO_x также при сильном предварительном подогреве воздуха для горения.

Македон Н. Е.

Научный руководитель Ярмольчик Ю. П., к.т.н., доцент

При беспламенном окислении газообразное топливо преобразуется невидимо и без обычного шума пламени. Это связано с отсутствием температурных пиков во фронте пламени, также становится возможным дальнейшее подавление температурного образования NO_x при более высоком предварительном подогреве воздуха.

Самым распространенным способом преобразования энергии из химически связанного состояния является сжигание в технических устройствах. Образующееся при сгорании тепло применяется, например, для нагрева промышленных печей, для получения технического пара или же для выработки механической или же электрической энергии. При горении образуются углерод, водород или их самые различные соединения, по возможности, полностью окисленные до углекислого газа и водяного пара. Необходимый для реакции кислород берется в основном из воздуха, где его содержание около 21%. Остальная часть воздуха - это в основном азот, который при горении рассматривается как инертный газ. Определение «инертный газ» действительно, однако, только для энергетической картины. При высоких температурах реагирует часть азота со свободными атомами по механизму Целдовича до окиси азота. Этот процесс определяется также как термическое образование окиси азота, поскольку реакция сильно зависит от температуры.

Существенное образование термического NO_x начинается от около 1600°C и очень сильно растёт с ростом температуры. Адиабатная температура горения обычного топлива достигает при использовании воздуха около 2000°C и соответственно повышается при предварительном подогреве воздуха для горения. Это ведет к тому, что в процессе горения, еще до введения граничных значений на допустимые выбросы, необходимо предпринять меры к снижению образования NO_x .

Принцип беспламенного окисления опирается на предварительное смешивание газов горения с инертными газами в таком соотношении, что даже при высоком предварительном подогреве воздуха можно избежать таких больших температурных пиков, как во фронте пламени. На рисунке 1 показаны максимальные температуры реакции смеси топливо/воздух/отходящие газы в зависимости от температуры предварительного подогрева воздуха. K_v обозначает при этом отношение рециркулируемого массового потока к сумме массовых потоков газообразного топлива и воздуха. Смесь перед реакцией полностью молекулярная. Температура в пространстве горения достигает 1000°C и соответствует температуре рециркулируемых отходящих газов. При $K_v = 0$, что соответствует отсутствию рециркуляции отходящих дымовых газов, проистекает адиабатная температура горения около 2000°C , при чем по определению не учитывается диссоциация продуктов горения. Эта температура растет при повышении температуры предварительного подогрева воздуха. При этом было принята упрощенно постоянная специфическая способность поглощения тепла продуктами горения как не зависящая от температуры. Пунктирные линии обозначают реальное изменение температур, при этом принимается во внимание диссоциация продуктов горения. Уже при самой малой рециркуляции отходящих газов ($K_v = 0,3$) можно заметить существенное снижение максимальных температур. При высоких температурах горения они лежат всё еще значительно выше 1600°C , так что при температурах предварительного подогрева воздуха для горения более 600°C даже при

использовании технологий снижения NO_x приходится считаться с высокими выбросами. При более высоких соотношениях предварительного смешивания максимальные температуры горения существенно снижаются и возрастают независимо от температуры предварительного подогрева воздуха. Однако горение не происходит при любом составе предварительной смеси. Если при горении со стабильным пламенем подмешивать в воздух для горения инертный газ, горение происходит стабильно лишь до определенной степени. Как только эти границы пересекаются, пламя становится нестабильным, обрывается и, в конце концов, гаснет. Также при высоких температурах горения это может привести к воспламенению в пространстве печи и ведет к неполному сгоранию, поэтому состояние нестабильного горения в любом случае необходимо избегать. Тем не менее, было показано, что при дальнейшем увеличении скорости рециркуляции отходящих газов, при определенных условиях, опять можно достигнуть стабильного состояния. При этом газообразное топливо невидимо и бесшумно полностью реагирует и поэтому этот способ горения называется «беспламенное окисление».

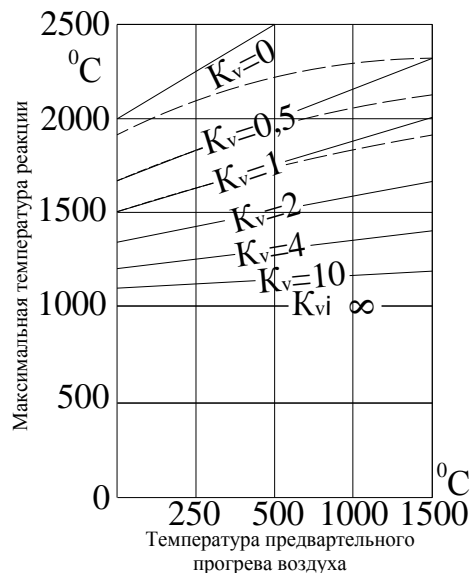


Рисунок 1 – Максимальная температура реакции

Способ горения называемый «беспламенное окисление» может широко использоваться в сфере энергетики и применяться на различных типах горелочных устройств. Например: горелка с внешним подогревом воздуха – для достижения необходимого предварительного смешивания может использовать венцеобразное расположение воздушных сопел. При этом с высокой скоростью поступающие турбулентные свободные струи засасывают отходящие газы из пространства горения, перед тем как произойдет реакция между газообразным топливом и кислородом. Таким образом самая высокая достигаемая локальная температура в реакционной зоне при 5-ти разовом предварительном смешивании и температуре в печи 1000°C всего лишь 1400°C даже тогда, когда воздух для горения подогревается до температуры в пространстве горения. На рисунке 2 показана схематически горелка, которая разработана для работы с воздухом для горения, подогрев которого производится отдельно. Второй подвод воздуха делает возможным работу в режиме пламя, до тех пор, пока в печи не будет достигнута температура, необходимая для режима «беспламенного окисления». Такая горелка имеет большой запас до разрешенной для многих применений границы в 500

$\text{mg}_{\text{NO}}/\text{m}^3$ (с учетом 5% O_2 в отходящих газах) даже при очень сильно подогретом воздухе.

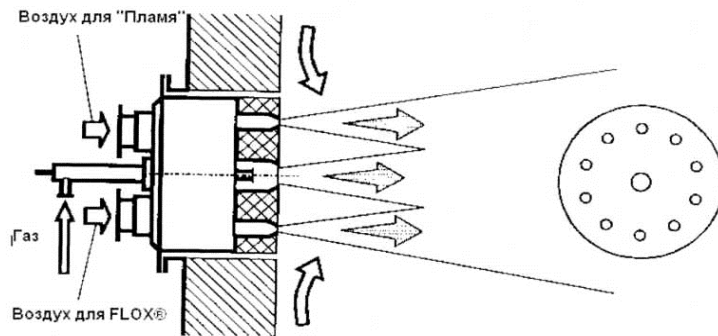


Рисунок 2 – Горелка для «беспламенного окисления» с внешним подогревом воздуха

- *рекуперативная горелка* – можно использовать для прямого и непрямого (косвенного) нагрева промышленных печей, в основном при применении природного и сжиженного газов. Горелка оборудована комплектным блоком управления, что позволяет моделировать систему нагрева печи отдельными самостоятельными блоками мощностью до 250 кВт. Предпочтительным является регулирование по принципу «Вкл./Выкл.», которое соответствует современной цифровой технике управления. Принцип беспламенного окисления применим для рекуперативных горелок. На рисунке 3 показана рекуперативная горелка для «беспламенного окисления». Рекуперативная горелка может быть оптимизирована таким образом, что возможно достижение практически нулевых выбросов. В результате натурных испытаний были получены следующие измерения:

топливо:	природный газ;
температура печи:	1000°C;
КПД:	> 80%;
NO_x в отходящих газах:	5 $\text{mg}_{\text{NO}}/\text{m}^3$ (с учетом 5% O_2 в отходящих газах).

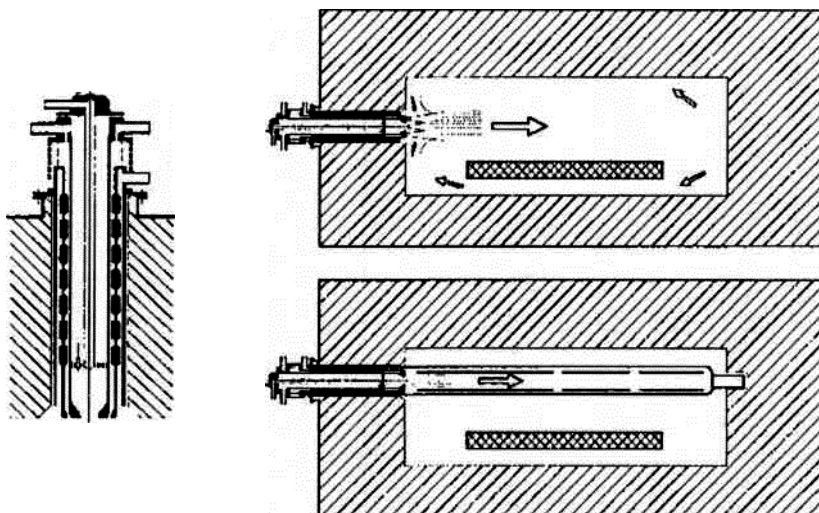


Рисунок 3 – Рекуперативная горелка «беспламенного окисления» для прямого и непрямого нагрева

- *регенерационная горелка* – основана на существенном увеличении поверхности теплопередачи. В конструкции регенерационной горелки предусмотрены переключающие клапаны на холодной стороне горелки. Таким образом, достигается высокий теплотехнический КПД даже при высоких температурах процессов в печи. Показанная на рисунке 4 конструкция горелки позволяет в полной мере использовать принцип беспламенного окисления. Регенерационные патроны расположены короннообразно вокруг центральной трубки подачи газа и пропускают через себя попеременно то воздух для горения (в печь), то отходящие газы (в общий коллектор). С регенерационной горелкой были получены следующие результаты измерения:

топливо:	природный газ;
температура печи:	1200°C;
КПД:	> 77-81%;
NO _x в отходящих газах:	от 86 до 107 мг _{NO} /м ³ (с учетом 5% O ₂ в отходящих газах).

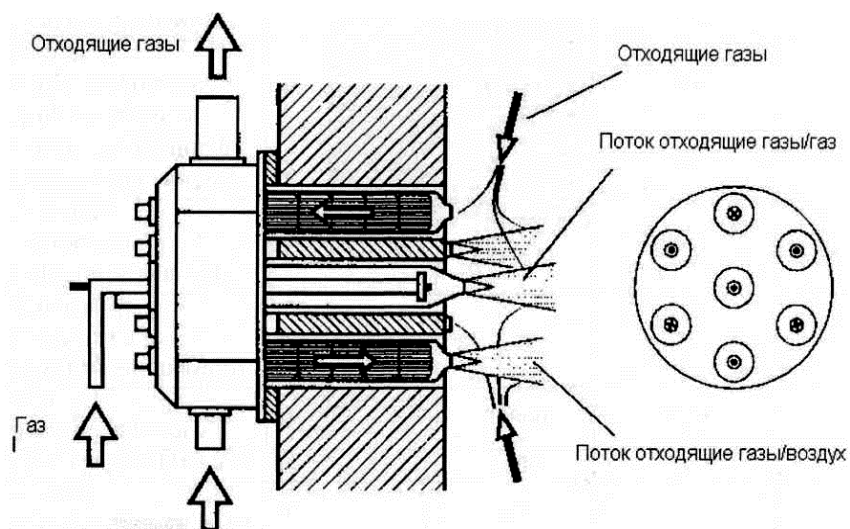


Рисунок 4 – Регенерационная горелка «беспламенного окисления»

Таким образом, в результате исследований принципиально нового способа горения – «беспламенного окисления» - были получены удовлетворительные результаты по КПД для низкотемпературных процессов (до 1200°C) со значительным (до абсолютного) снижением выбросов оксидов азота, что подтверждает перспективность такого способа, учитывая всё более жёсткие ограничения по объёмам вредных выбросов в промышленности.