

Беспламенное окисление: Горение с низким образованием NOx также при сильном догреве воздуха для горения

Выдержка из статьи доктора технических наук J.G. Wünnig (1993 год)

Краткое резюме

При беспламенном окислении газообразное топливо преобразуется невидимо и без обычного шума пламени. Поскольку отсутствуют температурные пики во фронте пламени, также становится возможным дальнейшее подавление температурного образования NO при более высоком догреве воздуха. В представленной статье предварительно объясняется принцип беспламенного окисления. Затем описываются уже воплощенные в жизнь примеры использования с измеренными величинами выбросов и достигнутыми теплотехническими КПД. В заключение представлены некоторые концепции, которые показывают возможное применение беспламенного окисления в различных областях преобразования энергии.

1. Введение

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 начинается от около 1600°C и очень сильно растёт с ростом температуры. Адиабативная температура горения обычного топлива достигает при использовании воздуха около 2000°C и соответственно повышается при предварительном нагреве воздуха для горения. Это ведет к тому, что при процессах горения, еще до введения граничных значений на допустимые выбросы, необходимо предпринять меры к снижению образования NO. Стоит упомянуть, например, очистку отходящих газов, технику ступенчатой подачи воздуха и газообразного топлива, распыление через специальные насадки воды, обратная подача отходящих газов и, не в последнюю очередь, ограничение температур процесса и предпрогрева воздуха горения, со связанным с этим снижением эффективности горения.

2.Беспламенное окисление

Принцип беспламенного окисления опирается на предварительное смешивание газов горения с инертными газами в таком соотношении, что даже при высоком догреве 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 предпрогрева воздуха. K_v обозначает при этом отношение рециркулированного массового потока к сумме массовых потоков газообразного топлива и воздуха. При этом мы исходим от полностью достаточной молекулярной смеси перед реакцией. 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 адиабативная температура горения около 2000°C , при чем по определению не учитывается диссоциация продуктов горения. Эта температура растет при повышении температуры предпрогрева воздуха. При этом мы упрощенно принимаем постоянную специфическую способность поглощения тепла продуктами горения как не зависящую от температуры. Пунктирные линии обозначают реальное изменение температур, причем 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 предпрогрева воздуха для горения более 600°C даже при использовании технологий снижения NO приходится считаться с высокими выбросами. При более высоких соотношениях предварительного смешивания максимальные температуры горения существенно снижаются и возрастают независимо от температуры предпрогрева воздуха.

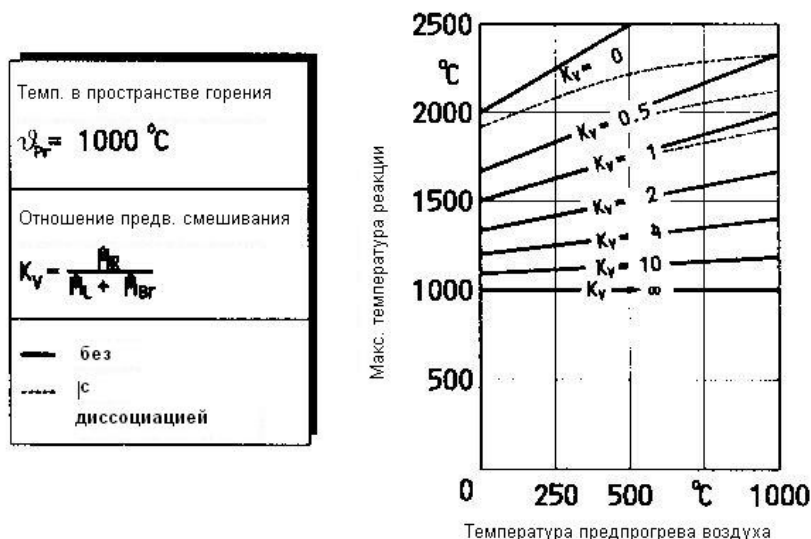


Рисунок 1: Максимальная температура реакции

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 FLOX® является научной разработкой и зарегистрированным торговым знаком фирмы «WS Wärmeprozess-technik GmbH», Renningen

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 определённых условиях, опять можно достигнуть стабильного состояния. При этом газообразное топливо невидимо и бесшумно полностью реагирует и поэтому этот способ горения называется «беспламенное окисление» или коротко «FLOX®» (flammlöse Oxidation).

На рисунке 2 представлены схематически области стабильно горящего пламени и беспламенного окисления в зависимости от соотношения предварительного смешивания и температуры в пространстве горения.

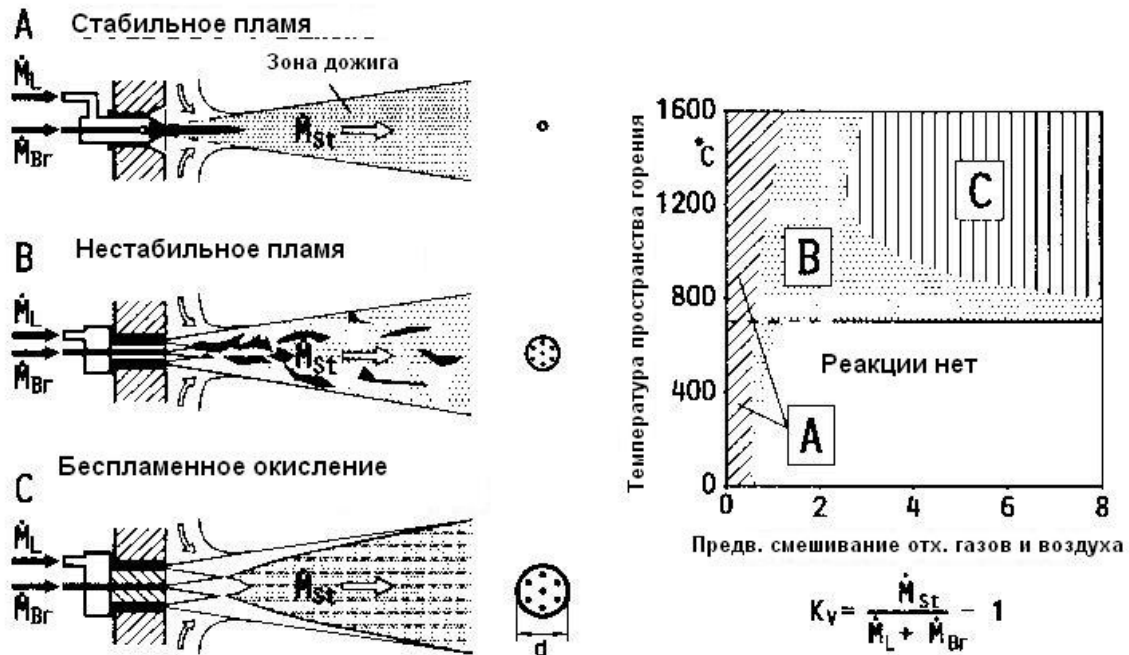


Рисунок 2: Области стабильности (схематично)

3. Применение

В следующем разделе представлены различные типы горелок. Все типы горелок уже реализованы и запущены в серийное производство.

3.1. Горелка со внешним догревом воздуха

Для достижения необходимого предварительного смешивания используется венцеобразное расположение воздушных сопел. 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 предварительно смешивании и температуре в печи 1000 °C всего лишь 1400 °C даже тогда, когда воздух для горения догревается до температуры в пространстве горения.

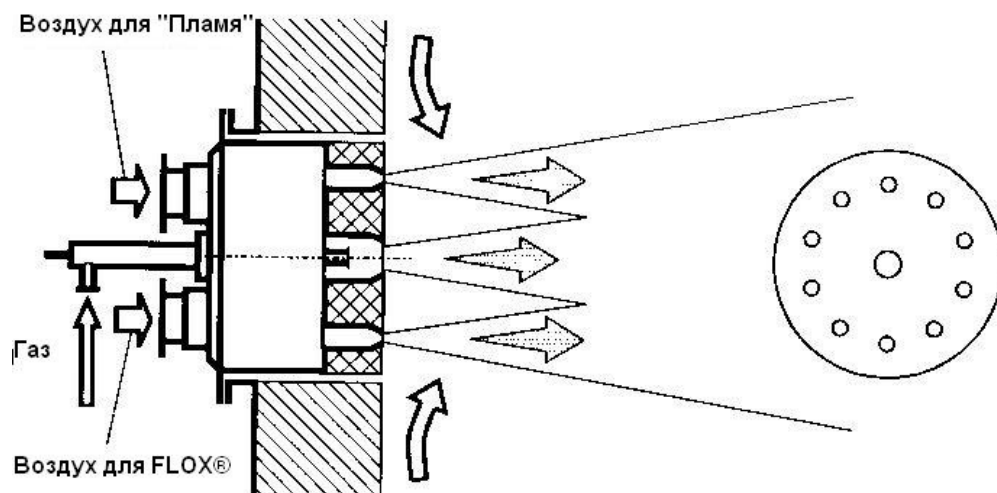


Рисунок 3: FLOX® горелка с внешним догревом воздуха

На рисунке 3 показана схематически горелка, которая разработана для работы с воздухом для горения, догрев 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 FLOX®. В институте газового отопления в Эссене было испытано множество современных горелок, работающих на природном газе, при температуре печи 1200 °C и при этом были измерены данные отходящих газов. На основании полученных значений NO_x была построена диаграмма, показанная на рисунке 4.

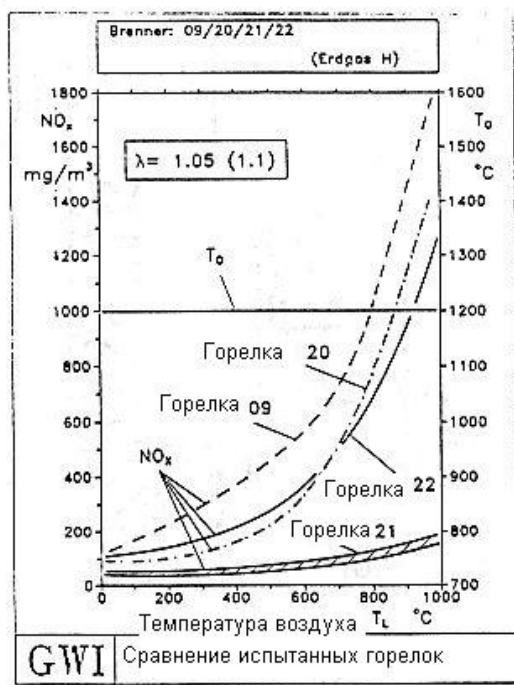


Рисунок 4: NO_x (показано как NO₂ в сухих отходящих газах с 5 об.% O₂ в зависимости от температуры предпрогрева воздуха

Горелка 21 – это 300 кВт FLOX-горелка, схема которой изображена на рис. 3. Другие горелки являются современными NO_x оптимизированными горелками.

FLOX® является научной разработкой и зарегистрированным торговым знаком фирмы «WS Wärmeprozess-technik GmbH», Renningen

Видно, что у этих горелок наблюдается резкое возрастание выбросов NOx при температуре предпрогрева воздуха выше, чем 600 °С.

FLOX горелка при этом имеет большой запас до разрешенной для многих применений границы в 500 мг_{NO}/м³ (с учетом 5% O₂ в отходящих газах) даже при очень сильно догретом воздухе.

3.2. Рекуперативная горелка

Для прямого и непрямого (косвенного) нагрева промышленных печей часто используются рекуперативные горелки, в основном при применении природного и сжиженного газов. Поскольку горелка и теплообменник являются одним целым, то потери в трубопроводах, которые присутствуют при применении центрального рекуператора, являются в этом случае ничтожными. 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 FLOX® применим для рекуперативных горелок. На рисунке 5 показана FLOX® - рекуперативная горелка, а также возможную возможность установки при прямом нагреве печи или же при непрямом нагреве металлическими излучающими радиантными трубами. Рекуперативная горелка, между тем, может быть оптимизирована таким образом, что могут быть достигнуты практически нулевые выбросы.

Топливо: природный газ (l=1,1)

Температура печи: 1000 °С

КПД: > 80%

NO в отходящих газах: 5 мг_{NO}/м³ (с учетом 5% O₂ в отходящих газах)

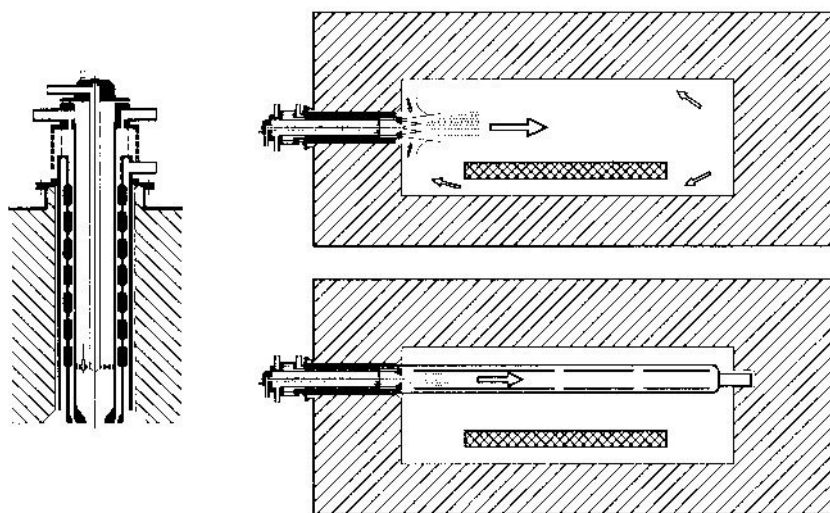


Рисунок 5: FLOX® рекуперативная горелка для прямого и непрямого нагрева

3.3. Регенерационная горелка

Существенное увеличение связанной с объёмом поверхности теплопередачи возможно в регенерационных горелках. 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 6 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 мощностью 80 кВт в институте газового нагрева в Эссене были получены следующие измерения:

Топливо: природный газ ($l=1,1$)

Температура печи: 1200°C

КПД: $> 77-81\%$

NOx в отходящих газах: от 86 до $107 \text{ мг}_{\text{NO}}/\text{м}^3$ (с учетом 5% O_2 в отходящих газах)

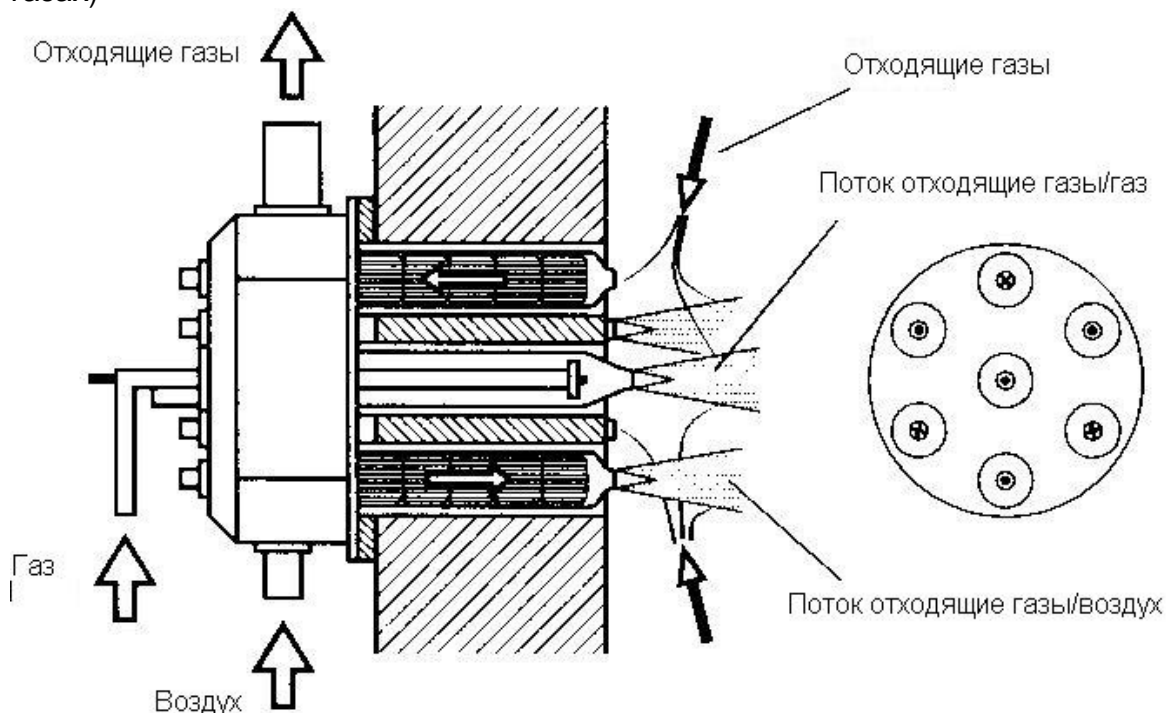


Рисунок 6: FLOX® регенерационная горелка