

УДК 621.438

КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ПОНИЖЕННЫМ ОБРАЗОВАНИЕМ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Дегтяренко Д.В.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Качан С.А.

При сжигании органического топлива (природного газа) в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ) образуются различные продукты сгорания, в том числе токсичные оксиды азота NO_x и монооксид углерода CO .

Известно, что различают три вида оксидов азота – термический, топливный и быстрый (таблица 1) [1, 2].

Таблица 1 – Основные механизмы образования оксидов азота

Механизм	Реакции	Характеристика
Термические NO_x	$N + O_2 \rightarrow NO + O$ $O + N_2 \rightarrow NO + N$ $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$	Очень зависит как от температуры, так и от продолжительности взаимодействия. Очень значительны при температуре выше $1400^\circ C$. Незначительные при температуре ниже $750^\circ C$.
Топливные NO_x	$CN + O_2 \rightarrow NO + CO$ $HCN \text{ or } NH_3 + O_2 \rightarrow NO, N_2O + N_2$	Образуются при реакции органически связанного азота в топливе с кислородом. Процесс сложный, всё ещё остаётся значительная неопределённость.
Быстрые NO_x	$CH + N_2 \rightarrow HCN + N$ $N + OH \rightarrow NO + H$ $N + O_2 \rightarrow NO + O$ $HCN + O_2 \rightarrow NO + CO + H$	Образуется в результате реакции углеводородных радикалов с атмосферным азотом, в итоге - HCN , а, значит, и NO_x вследствие ряда дальнейших реакций в газовой фазе. Процесс существенно не зависит от температуры, кроме случаев, когда топливо переобогащено. Становится более важным, когда другие механизмы образования NO_x были подавлены.

Главный фактор, определяющий образование термического азота – это температура в зоне горения (рисунок 1). Образование NO_x возрастает с повышением температуры в зоне синтеза NO_x по экспоненте, поэтому для снижения выхода оксидов азота необходимо в первую очередь снизить температуру в зоне горения.

В то же время для снижения образования CO необходимо увеличивать полноту сгорания топлива, то есть поддерживать достаточно высокую температуру (рисунок 2) [2].

Основные методы снижения образования NO_x при сгорании органического топлива представлены на рисунке 3 [2].

Ранее широко применяли впрыск воды или пара в камеру сгорания ГТУ для подавления токсичных выбросов, то есть так называемый «влажный» метод. Позже совершенствование камер сгорания привело к широкому распространению «сухих» методов снижения образования NO_x .

В европейских странах с жесткими экологическими требованиями к установкам, использующим органическое топливо, применяется каталитическая очистка уходящих газов.

Рассмотрим некоторые особенности «сухих» камер сгорания ГТУ, обеспечивающих низкие выбросы вредных веществ.

На рисунке 4 представлены схемы работы диффузионной камеры сгорания и камеры сгорания предварительного смешения [2]. Отличие в том, что последние имеют камеру предварительного смешения.

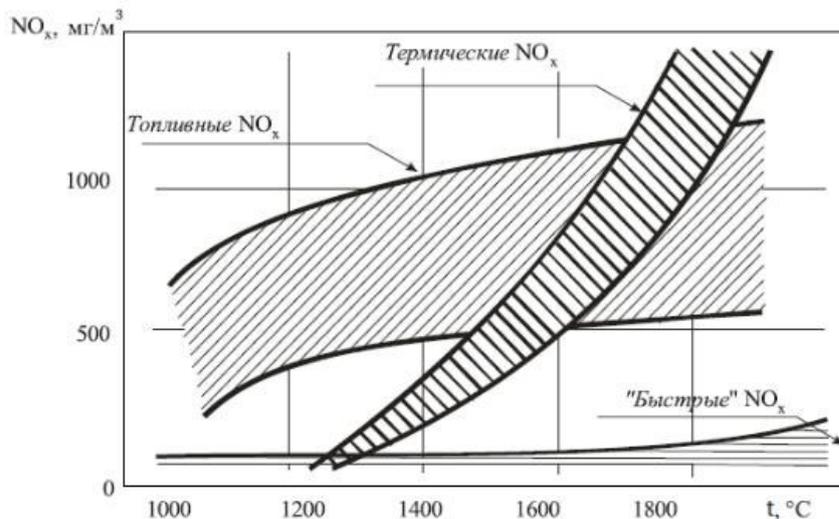


Рисунок 1. Зависимость образования оксидов азота от температуры горения

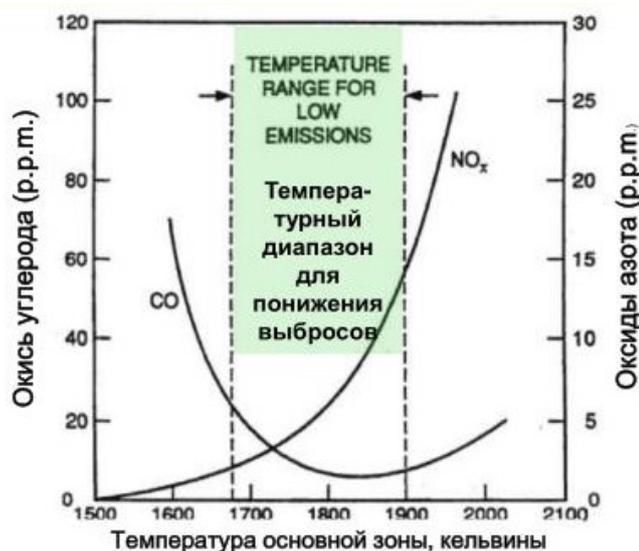


Рисунок 2. Зависимость эмиссии токсичных веществ от температуры горения



Рисунок 3. Основные методы снижения образования NO_x .

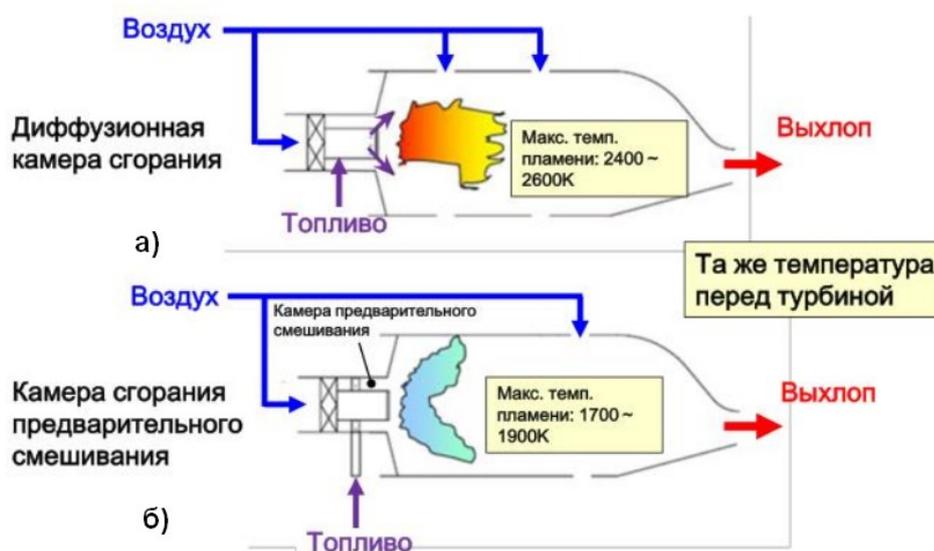


Рисунок 4. Схема работы камер сгорания: диффузионной (а) и предварительного смешения (б)

Применение камер сгорания с предварительным смешиванием позволяет снизить образование выбросов NO_x поскольку интенсификация смесеобразования в камере сгорания сокращает время образования оптимальной топливно-воздушной смеси. Это снижает вероятность образования локальных зон с «богатой» концентрацией топлива, а также способствует сокращению длины факела и обеспечивает короткое время нахождения газов в зоне высоких температур.

Одновременно обеспечиваются низкие выбросы CO и несгоревших углеводородов.

Для примера на рисунке 5 показана схема горелки ГТУ АЕ64. Ansaldo Energia [3].

ГТУ АЕ64.3А оснащена кольцевой низкоэмиссионной камерой сгорания DLN с 24 горелками типа HR3. Камера сгорания размещена в центральной секции двустенного корпуса. Корпус камеры сгорания состоит из литых

компонентов, выполненных из жаропрочного сплава. Детали и узлы камеры сгорания находятся в зоне прямого воздействия горячего воздуха, подаваемого из компрессора, поэтому поверхность камеры сгорания защищена термобарьерным покрытием с использованием керамических материалов.

Горелки HR3 разработаны на основе гибридного принципа (распыление/предварительное смешивание), что позволяет достигнуть низких уровней эмиссии NO_x и CO , стабильного горения при работе на жидком или газообразном топливе.

Аэродинамика горелки обеспечивается двумя концентрическими завихрителями (осевой и диагональный), вращающимися в одном направлении. Диффузионная горелка оснащена пилотной горелкой для работы на обедненном топливе. Работа на жидком топливе обеспечивается специальными форсунками, в которых жидкое топливо смешивается с деминерализованной водой для снижения уровней эмиссии NO_x .

Каналы распределения топливовоздушной смеси объединены в диагональные ребра, обеспечивая оптимальное смешивание топлива с воздухом. При работе на жидком топливе оно распыляется с помощью подаваемого воздуха, при этом капли топлива испаряются и смешиваются с воздухом.

Возможен автоматический переход работы с одного вида топлива на другой.

Уровень эмиссии NO_x при работе на природном газе составляет менее 50 мг/м^3 , на дизельном топливе – менее 120 мг/м^3 , уровень CO – 30 мг/м^3 на обоих видах топлива. При этом используется 45%-я эмульсия (деминерализованная вода/дизельное топливо). При работе на сухой, предварительно подготовленной топливной смеси уровень эмиссии NO_x составляет менее 250 мг/м^3 , деминерализованная вода при этом не используется.

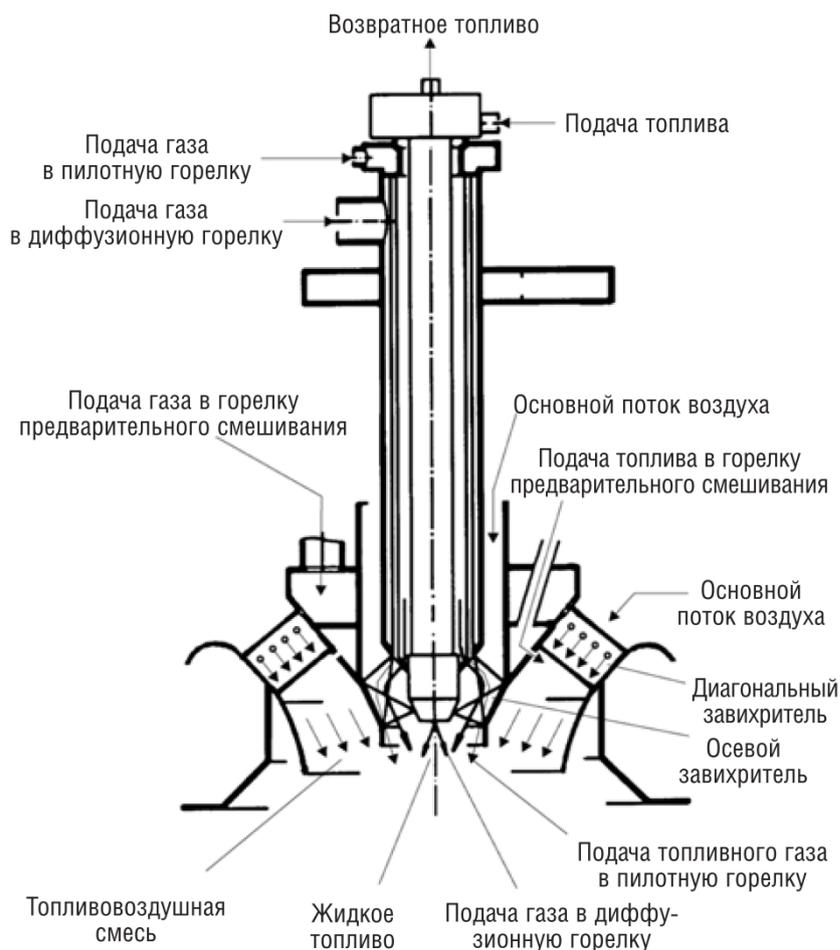


Рисунок 5. Схема горелки типа HR3

Сегодня перспективными являются разработки ГТУ, работающих при предельно высоких начальных температурах газов. Однако при повышении температуры газов на выходе из камеры сгорания до 1700–1800°C, уровень выбросов оксидов азота возрастает до 80–150 ppm [1].

Интересной и многообещающей представляется альтернативная технология каталитического горения (рисунок 6), которое может дать сверхнизкие уровни выбросов NO_x , CO и не сгоревших углеродов [2].

Каталитическое горение может снизить температуру горения топлива при той же скорости движения газов в камере сгорания в широком диапазоне отношения топливо/воздух или может увеличить скорость горения при том же температурном уровне. Первое позволяет снизить образование оксидов азота, второе позволяет снизить образование CO , т.е. обеспечить высокую степень полноты сгорания.

Применение катализаторов обеспечивает равномерное распределение температур в камере сгорания (КС).

Существует два способа применения катализаторов:

- КС с полным каталитическим горением. При этом обычно применяют пару катализаторов. Один, очень активный катализатор «воспламенения» стоит на входе, а второй стоит далее по течению газов. В таких КС подают заранее подготовленную гомогенную смесь.

- гибридная каталитическая КС. В таких КС процесс горения происходит ступенчато. На первой ступени происходит каталитическое горение, а во второй происходит горение гомогенной смеси. Причем, во второй ступени температура горения очень низкая, что снижает образование NOx.

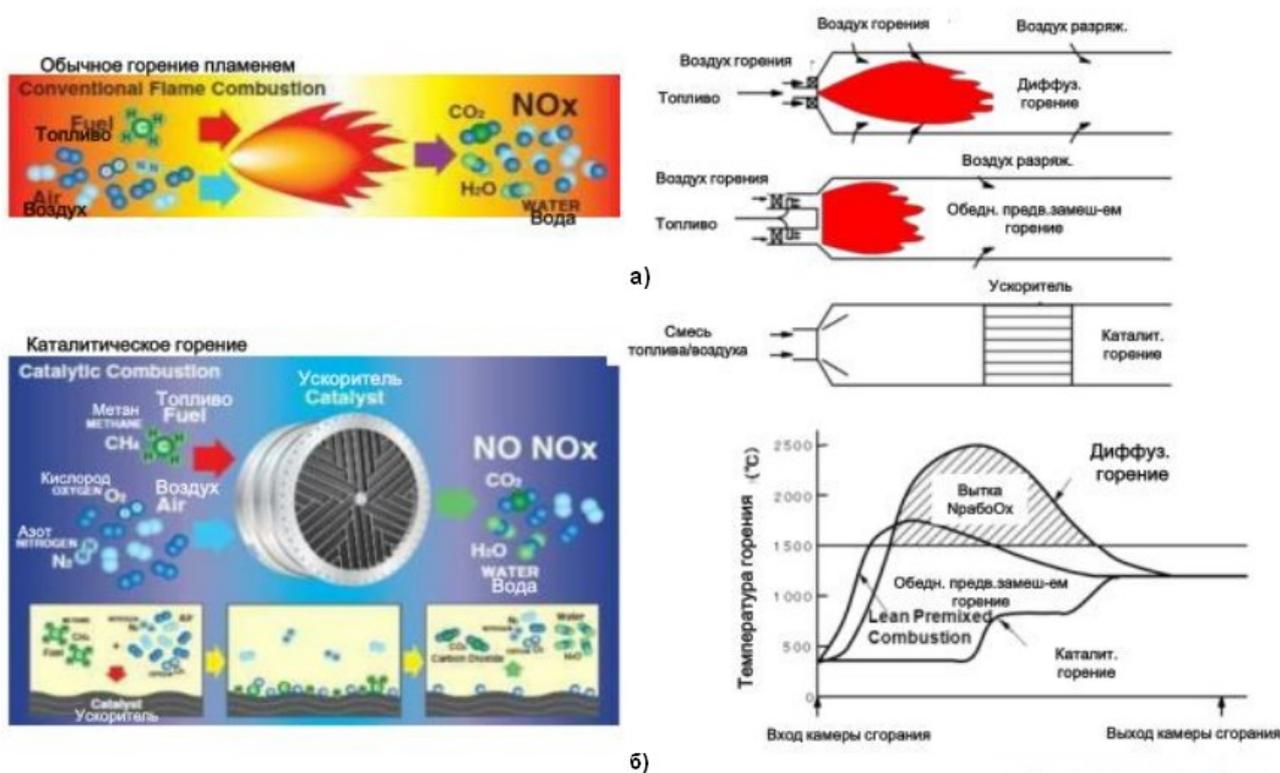


Рисунок 6. Схема работы камер сгорания с обычным горением (а) и каталитическим (б)

Катализаторы – важнейшие элементы камер сгорания. Они должны выдерживать длительный период работы при высоких температурах и воздействие неблагоприятных среды. Материал катализатора должен обладать свойством сопротивления истиранию. Необходимо обеспечение небольших потерь давления. Катализатор должен быть активен достаточно длительный период времени, для обеспечения хороших показателей.

К недостаткам данной технологии, также можно отнести:

- ограниченный ресурс работы каталитических материалов;
- высокая цена;
- необходимость пред-горелок для обеспечения окисления на катализаторе;
- низкая маневренность при изменении нагрузок;
- сложность конструкции;
- сложность работы при рециркуляции газов в КС.

Литература

1. Умышев Д.Р. Разработка и исследование камеры сгорания ГТУ с пониженным образованием токсичных веществ / Дисс... доктора философии. – Алматы, Республика Казахстан, 2017.

2. Shinich Kajita. Камеры сгорания газотурбинных установок / Лекция в Московском Энергетическом институте. Kawasaki Heavy Industries, Ltd. Gas Turbines & Machinery Company – Октябрь. – 2012. // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.slideserve.com/evadne/shinich-kajita-kawasaki-heavy-industries-ltd-gas-turbines-machinery-company>

3. Двигатель АЕ64.3А компании Ansaldo Energia: модификации для российского рынка / Леонардо Торбидони, Люка Абба, Роберто Абрам, Люка Бордо // Турбины и Дизели. 2014. – май июнь. – С. 30 – 35.