

«МОКРОЕ» ПОДАВЛЕНИЕ ЭМИССИИ NO_x В ГАЗОТУРБИННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ И ЕГО РЕАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Христич В.А., Баб Х.М., Левчук С.А., Ольховская Н.Н.

Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев

1. ОПТИМИЗАЦИЯ «МОКРОГО» ПОДАВЛЕНИЯ ЭМИССИИ NO_x

При работе ГТД на природном газе и нефтяных дистиллятах (которые не содержат в своем составе азота) основным механизмом образования в камере сгорания токсичных оксидов азота ($\text{NO} + \text{NO}_2 = \text{NO}_x$) считается «термическое» окисление атмосферного азота [1], интенсивность которого экспоненциально зависит от температуры в зоне горения.

Поэтому снижение этой температуры является основным средством уменьшения образования оксидов азота. Наиболее просто и эффективно это достигается впрыском в зону горения воды или водяного пара, которые образуют вместе совокупность так называемых «мокрых» способов подавления эмиссии NO_x .

Известно, однако, что ввод в зону горения H_2O , наряду со снижением эмиссии NO_x , негативно влияет на такие характеристики рабочего процесса камеры, как устойчивость горения и полнота выгорания топлива на частичных нагрузках (с образованием другого токсичного компонента - CO). Особенно ощутимы эти эффекты при работе камер сгорания с предварительным смесеобразованием и при вводе H_2O в виде воды. Вода, кроме того, заметно сокращает ресурс жаровой трубы камеры сгорания. В связи с этим при реализации технологии «мокрого» подавления эмиссии NO_x предпочтительным следует считать диффузное горение в камере и использование H_2O в парообразном виде.

Однако на паре, как и на воде, все негативные последствия впрыска возрастают по мере увеличения его концентрации (расхода), в то время как эффективность подавления паром NO_x в разных камерах при этом существенно различна. Из этого очевидна необходимость оптимизации впрыска пара в камеру сгорания с тем, чтобы необходимая степень снижения эмиссии NO_x достигалась как можно меньшим расходом пара.

В принципе, ввод пара для этой цели может быть осуществлен в жаровую трубу различными способами. Известно, однако, что процесс образова-

ния оксидов азота происходит не во всем ее объеме, а локализуется в определенных зонах, где имеют место наиболее благоприятные для этого условия, то есть максимально высокие температуры и наличие свободного кислорода. Из этого можно заключить, что сокращению необходимого расхода «экологического» пара мог бы способствовать концентрированный целевой ввод его именно в эти зоны. Однако практическое решение такой задачи очень сложно из-за нестабильности температурных и концентрационных полей в жаровой трубе, которые зависят как от режимных параметров рабочего процесса, так и от конструктивных особенностей фронтального устройства камеры сгорания, определяющих схему ввода топлива, а также способы смешения его с воздухом и стабилизации горения. Задача дополнительно усложняется тем, что образование составных компонентов NO_x может иметь место, как в зоне пламени¹, так и за его пределами. К тому же, зоны максимальных температур в горящем факеле и максимального уровня локальных концентраций оксидов азота, обычно не совпадают [3].

При такой сложной температурно-эмиссионной картине в факеле и недостаточности информации в отношении условий, которые влияют на нее в реальной камере сгорания, невозможно априорно спрогнозировать оптимальную схему ввода «экологического» пара в жаровую трубу.

Поэтому в рамках настоящего исследования задача решалась экспериментально. С этой целью в натурной камере сгорания (с жаровой трубой типа, изображенного на рис. 1.а) опробованы были 4 схемы ввода «экологического» пара (рис. 2):

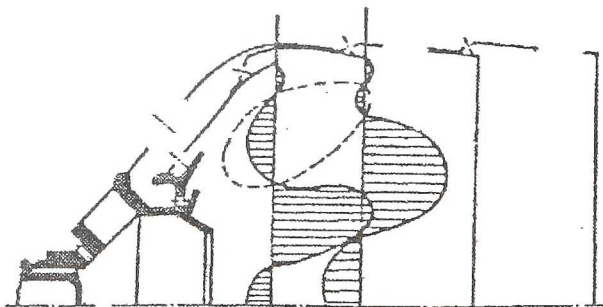


Рис. 1. Жаровая труба камеры сгорания и структура течения в её первичной зоне

¹ Так называемые «быстрые» NO [2]

- 1 - в виде концентрированной паровой струи, развивающейся вдоль оси жаровой трубы;
- 2 - в виде системы радиальных паровых струй;
- 3 - в виде паротопливной² смеси;
- 4 - в виде паровоздушной смеси (с первичным воздухом).

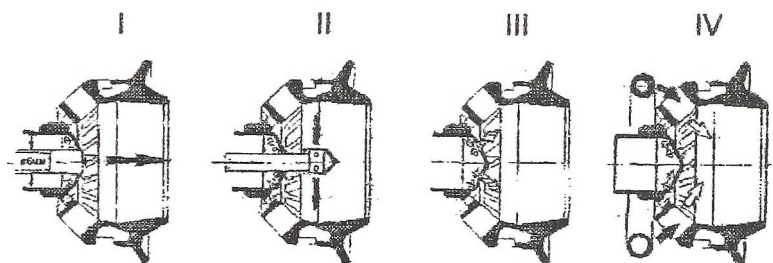


Рис. 2. Варианты ввода пара в зону горения:

 Пар;
  Парогазовая смесь;
  Паровоздушная смесь.

Кроме того, испытания схемы 2 проводились с различным удалением паровой форсунки от выходного среза фронтального устройства камеры сгорания (X , мм). Их результаты представлены на рис. 3 в виде концентрации NO_x на выходе из камеры сгорания при трех относительных расходах впрыскиваемого пара:

$$\bar{g}_{\text{п+в}} = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{п}} + G_{\text{в}}} = 0; 0,29; 0,58,$$

где $G_{\text{п}}, G_{\text{в}}$ — абсолютные расходы пара и воздуха.

Как видно, кривые $\text{NO}_x = f(X)$ режимов с впрыском пара имеют две характерные области:

- 1 - где место ввода пара (X) практически не имеет значения и увеличение $\bar{g}_{\text{п+в}}$ существенно снижает образование NO_x ;
- 2 - где дальнейшее увеличение X уменьшает влияние $\bar{g}_{\text{п+в}}$, вследствие чего возрастает выходная концентрация NO_x , приближаясь к режиму без впрыска пара (пунктир).

Анализ статистических данных и известных зависимостей размеров зоны рециркуляции от геометрии жаровой трубы и режима работы камеры

² Топливом во всех экспериментах служил природный газ.

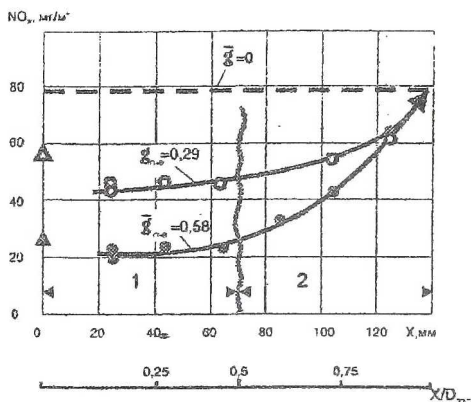
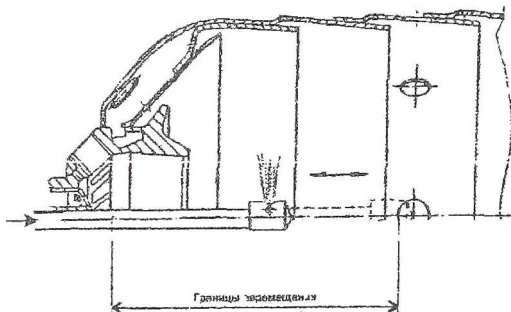


Рис. 3. Влияние размещения паровпуска вдоль оси камеры на образование NO_x

Именно таким образом выполнены все четыре схемы рис. 2. Их опробование проводилось на одном и том же режиме (Табл. 1), который приближенно имитировал максимальную нагрузку энергетического ГТД.

Таблица 1. Режим испытаний натурной камеры сгорания

Давление в камере сгорания	$P_B \approx 0,12 \text{ МПа}$
Температура воздуха на входе	$T_B = 550 - 570, \text{ К}$
Скорость воздуха (в мидельсовом сечении жаровой трубы)	$W_B^{\text{mid}} \approx 18 \text{ м/с}$
Коэффициент избытка воздуха	$\alpha_0 \approx 3 - 4$
Температура продуктов сгорания	$T_{\text{пс}} \approx 1470 - 1500 \text{ К}$

Полученные результаты в виде зависимости

$$\text{NO}_x = f(\bar{g}_T) = f(G_n/G_T); \text{ мг/м}^3,$$

где G_T – расход топливного газа,

привели к выводу, что длина области 1 отвечает длине зоны рециркуляции за завихрителем фронтного устройства камеры сгорания. Из этого следует, что:

впрыск в пределах зоны рециркуляции является первым условием обеспечения эффективного использования «экологического» пара;

- поскольку приближение X к пульсирующей задней границе зоны рециркуляции все же сопровождается некоторым снижением эффективности влияния пара на эмиссию NO_x , целесообразным представляется ввод пара как можно ближе к передней ее границе, то есть к срезу фронтного устройства камеры.

изображены на рис. 4.а. Обращает на себя внимание высокая эффективность влияния H_2O на снижение концентрации NO_x , особенно с II-IV вариантами ввода пара.

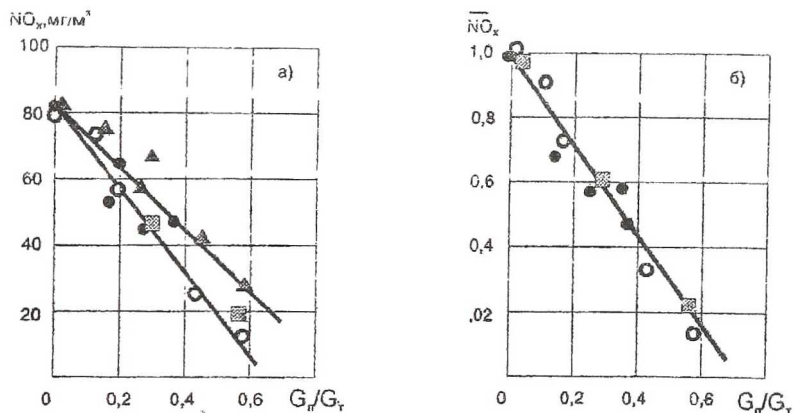


Рис. 4. Влияние схемы ввода пара в зону горения на зависимость концентрации NO_x от относительного расхода пара (G_{II}/G_T):

▲ I-вариант; ■ I-вариант;

● II-вариант; ○ II-вариант.

($T_0=573K$; $P_0 \approx 0,12MPa$; $W_0^{ид}=18m/c$; $T_{\text{г}} \approx 1500K$).

Вариант I отличается в некоторой мере меньшей эффективностью, так как в его схеме значительная дальнобойность паровой струи вдоль зоны рециркуляции [4]:

$$l_{\text{стр}} \sim d \frac{W_{\text{стр}}}{W_{\text{рец}}}, \quad (1)$$

где d – диаметр парового сопла;

$W_{\text{стр}}$ – скорость струи;

$W_{\text{рец}}$ – скорость на оси рециркуляционного течения.

отдаляет от фронтального устройства область рассеивания пара по сечению жаровой трубы.

Что же касается вариантов II-IV, где ввод и рассеивание пара реализуется вблизи фронтального устройства, то они в условиях испытанной камеры сгорания обеспечили практически одинаковый результат, который в безразмерном виде (рис. 4.б) может быть описан общей зависимостью:

$$\overline{\text{NO}_x} = \text{NO}_x / (\text{NO}_x)_{\text{гТ=0}} \approx 1 - 1,34 \frac{G_n}{G_T} \quad (2)$$

Такую индифферентность к различиям схем ввода пара можно объяснить высокой интенсивностью массообменных процессов в первичной зоне испытанной камеры, где ее аэродинамика представляет собой (рис. 1.6) довольно сложную совокупность циркуляционных течений

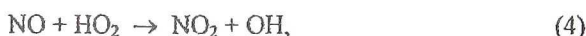
Вероятно, при меньшей интенсивности массообмена в этой зоне такие различия становятся более заметны, что и наблюдалось в других известных исследованиях [5] и др.

2. РЕАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРОВОГО ПОДАВЛЕНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА³

«Термическое» окисление атмосферного азота реализуется, как известно [1], по цепному механизму:



то есть первичным продуктом окисления является монооксид азота – NO, который может далее доокисляться до диоксида NO₂ как в камере сгорания, где основной такой реакцией является:



так и за камерой (в атмосфере) – по реакции



В первом из этих уравнений: H₂O – пероксидный радикал, а во втором: O₃ – атмосферный озон [3].

При анализе проблем глобального загрязнения атмосферы предполагается полный переход NO в NO₂ и токсичность выхлопных газов оценивается как:

$$\Phi_{\text{NO}_x} = \Phi_{\text{NO}_2} = \text{NO}_x / \text{ПДК}_{\text{NO}_2} = \text{NO}_x / 0,085,$$

где ПДК – предельно допустимая по санитарным нормам концентрация поллюанта в воздухе населенных мест.

³ В настоящем исследовании не регистрировалось влияние H₂O на эмиссию CO и других поллюантов, поскольку в современных ГТД впрыск «экологического» пара осуществляется только на режимах высокой нагрузки, а на частичных – даже запрещается [6].

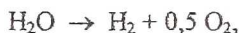
При работе камеры сгорания без впрыска пара, концентрация радикала NO_2 в жаровой трубе при высоких температурах очень невелика, вследствие чего концентрация NO_2 в выхлопных газах на максимальной нагрузке ГТД не превышает 5-10%. В этом случае их фактическая токсичность, формирующая реальную ситуацию в приземном слое близлежащей к энергообъекту территории, должна оцениваться как:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\text{NO}} + \Phi_{\text{NO}_2} = \frac{\text{NO}}{\text{ПДК}_{\text{NO}}} + \frac{\text{NO}_2}{\text{ПДК}_{\text{NO}_2}} = \frac{\text{NO}}{0,6} + \frac{\text{NO}_2}{0,085}$$

Поскольку ПДК_{NO} почти на порядок выше ПДК_{NO_2} , Φ_{Σ} реальных выхлопных газов оказывается существенно ниже, чем Φ_{NO_x} , рассчитываемого по соотношению

$$\text{NO}_x = \text{NO} \left(1,53 + \frac{\text{NO}_2}{\text{NO}} \right) \quad (6)$$

Однако, при впрыске в зону горения водяного пара, в локальных ее областях, где $\alpha \rightarrow 1$, температура может достигать значений, при которых одновременно с основной обратимой реакцией диссоциации воды:



увеличивается вероятность реакций



с образованием радикалов атомарного водорода (H). Вместе с реакцией



это должно увеличивать их концентрацию в реакционной зоне и, соответственно, концентрацию пероксидного радикала HO_2 , который образуется в соответствии с реакцией



(где M – любая третья молекула, назначением которой является энергетическая стабилизация радикала) и затем по реакции (4) – способствует доокислению NO до NO_2 , увеличивая токсичность выхлопных газов.

Достоверность такого алгоритма трансформаций подтверждается экспериментом, который был проведен на упрощенной модели камеры сгорания с возможностью отдельной фиксации NO , NO_2 , NO_x . Как видно из рис. 5.а,

при вводе пара в камеру сгорания, одновременно со снижением концентрации NO_x происходит резкое увеличение отношения NO_2/NO . В результате этого реальный фактор токсичности (Φ_x), как видно из рис. 5.б, при этом не только падает, намного слабее, чем расчетный фактор Φ_{NO_x} , но может даже от впрыска пара возрасти (при $T_3 = \text{const}$).

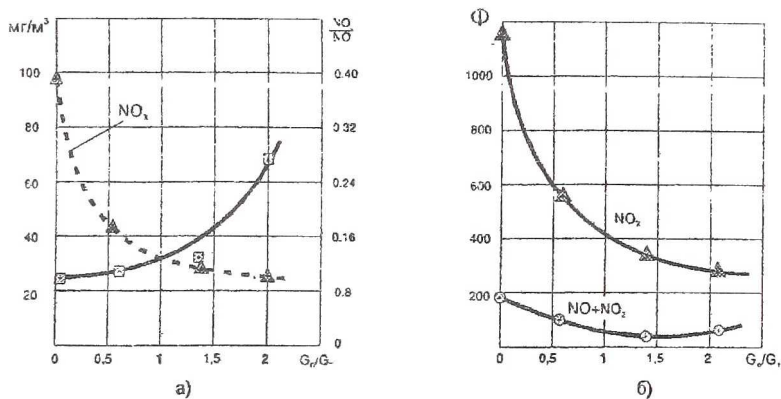


Рис. 5. Влияние водяного пара на эмиссию оксидов азота (а) и их токсичность (б).
($T_3=573\text{K}$; $P_3 \approx 0,12\text{МПа}$; $W_3^{\text{мд}}=18\text{м/с}$; $T_{\text{сг}} \approx 1500\text{K}$).

Все это дает достаточные основания для уточнения роли и эффективности технологий «мокрого» подавления эмиссии оксидов азота в ГТД, а также внесения определенных коррективов в разработку систем выхлопа и рассеивания выхлопных газов в атмосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б., Садовников Л.Я., Франк-Каменецкий Д.А., Окисление азота при горении. – М.: Наука, 1947. – 146с.
2. Fenimore C.P., Hilt H.B., Jonson R.N., Formation and Measurement of Nitrogen Oxides in Gas Turbines. // Gas Turbine International. – 1971. – №4. – P.37...41.
3. Сигал И.Я., Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1988. – 312с.
4. Горбатко А.А., Липатов П.А., О механизме стабилизации пламени при подаче топлива или топливовоздушной смеси в зону циркуляции за плохообтекаемым телом. // Труды ЦИАМ. – 1983. – №1082. – С.8.
5. Dibelins N.R., Hilt H.B., Jonson R.N., Reduction of nitrogen oxides from gas turbines by steam injection. // Pap. Of the ASME. – 1971. – №58. – P.76...82.
6. Вернем В., Джуллиани М., Мёллер Д., Разработка, монтаж и испытание системы впрыска пара (STIG) в газогенераторе LM5000 фирмы Дженерал Электрик. // Энергетические машины. – 1988. – №2. – С.11...18.