

рости образования окиси азота $\Delta c_{\text{NO}}/\Delta\tau$:

α_{r}	$(\Delta c_{\text{NO}}/\Delta\tau)$, %/с	l' , м	T' , К	T_{max} , К	T'/T_{max}
1,02	0,130	1,46	1910	2000	0,96
1,065	0,160	1,14	1930	2040	0,95

Построение графиков $\Delta c_{\text{NO}}/\Delta\tau = f(\tau)$ позволило определить временную координату и расстояние l' точки, в которой наблюдается максимальная скорость образования NO, от устья горелки (что имеет немаловажное значение, в частности, при выборе места ввода влаги для зонального воздействия на факел с целью уменьшения выброса окиси азота). Выше приведены результаты таких построений и расчетов для рассматриваемых двух опытов на котле ТГМП-314. Кроме l' даны температуры T' , при которых наблюдается $(\Delta c_{\text{NO}}/\Delta\tau)_{\text{max}}$ и их отношения к максимальной температуре факела. Эти отношения оказались близкими к полученным для указанных выше стендовых экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. М. Фристром, А. А. Вестенберг. Структура пламени. М.: Metallurgy, 1969.
2. Б. М. Гурович, С. М. Межеричкий, Л. М. Цирульников и др. Изв. АН УзССР. Сер. техн. наук, 1981, 3, 30.
3. Я. И. Соколова, Л. М. Цирульников, В. Г. Конохов. Снижение образования ароматических углеводородов при сжигании природного газа (информационный обзор, № 4). М.: ВНИИЭГазпром, 1982.
4. Аэродинамика закрученной струи/Под ред. Р. Б. Ахмедова. М.: Энергия, 1977.
5. Р. Б. Ахмедов, Д. М. Ахмедов, Т. Б. Балагула.— В кн.: Использование газа в народном хозяйстве. Вып. 8. М.: ВНИИЭГазпром, 1976.

Поступила в редакцию 11/IX 1985,
после доработки — 21/I 1986

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ В ТОПЛИВЕ НА ЭМИССИЮ ОКСИДОВ АЗОТА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. П. Свинухов, Е. М. Филиппова

(Москва)

В рамках решения экологической проблемы в настоящее время большое внимание уделяется вопросам оценки и уменьшения выбросов оксидов азота различными техническими устройствами, в том числе и газотурбинными двигателями. С перспективой использования альтернативных топлив из угольного и сланцевого сырья ожидается увеличение связанного азота в топливе (топливного азота), содержание которого по оценкам может доходить до 1,0—1,5% [1]. Если же учесть, что выход топливной NO при условии полного перехода 1% азота в NO дает индекс эмиссии, равный 33 ед. (в эквиваленте NO₂), то становится очевидным, что пренебрегать этим фактором нельзя. Под индексом эмиссии понимается отношение ингредиента в граммах (в данном случае NO и NO_x) к килограмму сожженного топлива.

Анализ ранее проведенных исследований в этой области (см. [2—4] и др.) свидетельствует прежде всего о недостаточности экспериментальных данных для понимания процессов образования топливной NO_x. В частности, требуются убедительные доказательства для правомерности утверждения о том, что выход NO_x не зависит от типа азотсодержащих соединений в топливе и при горении все количество связанного азота сначала превращается в NO, а последующее образование или разложение оксида азота определяется механизмом Зельдовича [3, 4]. Во всяком случае, такое допущение, как и всякое другое, требует точностной оценки.

Цель настоящей работы — экспериментальное определение зависимости выхода топливной NO_x от содержания связанного азота в топливе, имитируемого различными видами азотсодержащих соединений, применительно к камерам сгорания газотурбинных двигателей.

Исследования проводили на малоразмерном газотурбинном двигателе с типичной для такого класса двигателей кольцевой камерой сгорания с завихрительным фронтальным устройством и на двух режимах работы двигателя, отличающихся в основном дисперсностью распыла топлива и параметрами воздуха на входе в камеру. На режиме 1 температура, давление и коэффициент избытка воздуха в зоне горения камеры сгорания составляли $T_K = 450 \text{ K}$, $p_K = 0,3 \text{ МПа}$, $\alpha = 1,05$, а на режиме 2 — $T_K = 330 \text{ K}$, $p_K = 0,16 \text{ МПа}$ и $\alpha = 1,00$. В первом режиме к фронту горения подавалась испаренная топливно-воздушная смесь, а во втором имело место горение капель топлива вследствие низкого перепада давления топлива на центробежной форсунке.

Отработанные газы анализировали непрерывно в темпе эксперимента по компонентам NO , NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), CO , CO_2 и C_xH_y с тем, чтобы можно было рассчитать величину индекса эмиссии оксидов азота (EI_{NO_x}). Анализ NO и NO_x проводился на хемилюминесцентном анализаторе, в котором при определении NO_x газ перед анализом проходил через конвертер, преобразующий NO_2 в NO . CO и CO_2 исследовали в инфракрасных анализаторах, а несгоревшие углеводороды — в анализаторах с пламенно-ионизационным детектором в водородном пламени. Указанная измерительная аппаратура обладает высокой точностью и в комплексе с высокими характеристиками стенда обеспечивает определение EI_{NO_x} с погрешностью не хуже $\pm 1,0\%$ при двух параллельных измерениях с доверительной вероятностью 0,95.

Исследовались топливо ТС-1 и азотсодержащие соединения: пиридин ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$), пиперидин ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{N}$) и анилин ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$). Использование этих веществ диктовалось наличием подобных соединений с высокомолекулярным строением в дистиллятах нефтей и крекинга [5], а также в продуктах сжигания угля. Кроме того, выбор определялся стремлением проследить выход топливной NO_x из азота, содержащегося в трех характерных для топлива группах углеводородных соединений, т. е. азота из ароматического кольца (пиридин), из нафтенового кольца (пиперидин) и из простого линейного присоединения (аминная группа NH_2 анилина).

Окисление молекулярного азота воздуха, поступающего в камеру сгорания, в соответствии с механизмом Зельдовича [6] идет в основном по схеме $\text{N}_2 + \text{O} \rightleftharpoons \text{NO} + \text{N}$ с большой затратой энергии на разрыв молекулярного азота, равной 47 ккал. Предполагается, что для отрыва атома N из углеводородного соединения потребуется энергии значительно меньше, что должно вызвать рост эмиссии NO даже при низких температурах пламени.

Результаты испытания топлива ТС-1 с добавками пиперидина представлены на рис. 1. При малых концентрациях N резко увеличивается NO_x , но по мере достижения $[\text{N}] \approx 0,75\%$ наблюдается выход на «полку».

Уменьшение выхода NO с ростом содержания азота в топливе, по видимому, можно объяснить недостаточным количеством в зоне их образования атомарного кислорода, расходуемого на основную реакцию горения. Подтверждением этого может служить рост отношения $[\text{NO}]/[\text{NO}_x]$ (рис. 2). Отметим, что, хотя испытываемые азотсодержащие соединения легко испаряются, на режиме 2 эмиссия оксида углерода увеличивается до 10% (при $[\text{N}] \rightarrow 1\%$) с одновременным снижением эмиссии несгоревших углеводородов. В любом другом случае ввод легкоиспаряющихся фракций в керосиновое топливо на режиме, когда горят капли топлива, приводит к одновременному уменьшению как $[\text{C}_x\text{H}_y]$, так и $[\text{CO}]$. Этот факт свидетельствует, с одной стороны, о большой активности топливного азота, способного отнимать кислород из реакции окисления CO в CO_2 , оказывая «паразитное» влияние на горение топлива,

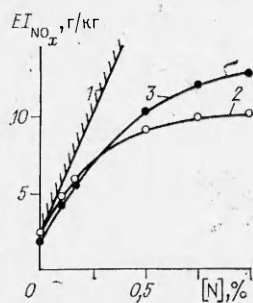


Рис. 1. Изменение эмиссии оксидов азота при вводе в топливо ТС-1 пиперидина ($[N]$ — массовая концентрация азота). 1 — выход NO_x 100%; 2, 3 — режимы 1, 2 соответственно.

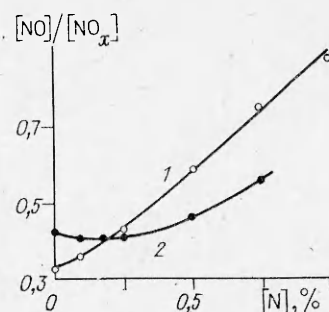


Рис. 2. Изменение $[NO]/[NO_x]$ при вводе в ТС-1 пиперидина. 1, 2 — режимы 1, 2 соответственно.

а с другой — подтверждает наличие дефицита O , объясняющего характер поведения выхода топливной $NO_x(g)$.

При представлении величины g в логарифмических координатах удается линеаризовать зависимость $g = f([N])$ (рис. 3, а). Как видно, в данном случае не наблюдается 100%-ного выхода NO_x при $[N] \rightarrow 0$, как, впрочем, и с другими азотсодержащими соединениями. Этим полученные результаты качественно отличаются от представленных в работе [2], где авторы экстраполировали зависимости к 100%-ной точке.

В опытах с другими топливами (изооктан и спирт) получен тот же характер изменения величины g с ростом содержания азота, хотя значения g несколько различны (рис. 3, б). Обнаруженная (хотя и незначительная) разница для керосинового и изооктанового пламени входит в противоречие с выводами работ [3, 4], связывающих увеличение g с уменьшением температуры пламени (так как температура керосинового пламени выше) и основанных на обнаруженном эффекте роста общего уровня NO_x с впрыском воды (снижение температуры пламени).

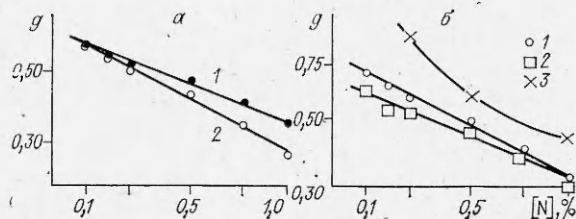
По мнению авторов настоящей работы, можно иначе объяснить выход NO_x для различных топлив, по крайней мере для стехиометрических и несколько переобогащенных смесей, а именно — дефицитом атомарного кислорода, о чем говорилось выше. Действительно, углеводородные пламена с более низкой температурой пламени, каким является изооктановое (по сравнению с керосиновым), должны характеризоваться более низкими концентрациями равновесного атомарного кислорода в зоне горения, столь необходимого для окисления азота.

Однако для спиртового пламени (еще более низкая температура) наблюдается увеличенное значение g по сравнению с ТС-1. Это можно объяснить присутствием атома кислорода в молекуле спирта, способствующего окислению топливного азота, которое помимо указанного меняет сам характер выхода NO_x при уменьшении содержания топливного азота, т. е. достигает 100% выхода при $[N] < 0,25\%$ (см. рис. 3, б).

При вводе в ТС-1 других азотсодержащих соединений (пиридин и анилин) наблюдается тот же характер уменьшения g с ростом $[N]$, однако уровень выхода зависит также и от структуры азотсодержащего соединения. Так, из рис. 4 видно, что наименьшие значения g наблюдаются для пиридина, а наибольшие — для пиперидина и анилина. По-ви-

Рис. 3. Выход топливной NO_x при вводе пиперидина в различные топлива.

а) ТС-1: 1 — режим 2, $g = 0,787 (1 + [N])^{-1,187}$, 2 — режим 1, $g = 0,791 (1 + [N])^{-1,695}$; б) режим 2: 1 — ТС-1, 2 — изооктан, 3 — спирт (этанол).



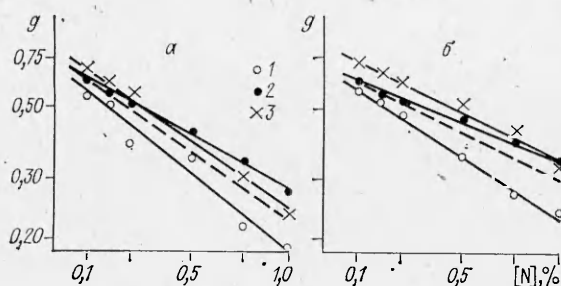


Рис. 4. Выход топливной NO_x при вводе в ТС-1 различных азотсодержащих соединений.

а) режим 1; б) режим 2; 1 — пирин; 2 — пиперидин; 3 — анилин; штриховые линии: $g = 0,683 (1 + [N])^{-1,586}$ (а) и $0,697 (1 + [N])^{-1,218}$ (б).

димому, атому азота труднее «освободиться» из бензольного кольца (пирин), чем порвать связи в аминной группе (анилин) или в нафтеновом кольце с одинарными связями (пиперидин). Эти данные опровергают предположения, выдвинутые в [3, 4], о том, что весь азот топлива мгновенно переходит в NO , а далее конечный выход NO_x определяется кинетикой образования и разложения по термическому механизму Зельдовича. Во всяком случае, погрешность такого допущения по полученным в настоящей работе данным следует оценивать до 20%.

Для более детальной идентификации механизма образования топливной NO_x требуются дальнейшие исследования, но они, по-видимому, будут иметь чисто научный интерес, поскольку на практике даже идентифицировать азотсодержащие соединения в топливе не всегда удается. Указанные обстоятельства затрудняют точную априорную оценку «выхода» оксидов азота газотурбинного двигателя, однако для приближенных расчетов можно рекомендовать следующую обобщенную зависимость с погрешностью до 10% на уровне $[N] = 0,1\%$ и до 25% при $[N] = 1,0\%$, полученную статистической обработкой экспериментальных данных на обоих режимах для керосинового пламени и различных азотсодержащих соединений:

$$g = 0,690 \cdot (1 + [N])^{-1,387}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. П. М. Канило, В. Д. Однолетков, В. И. Шмидт. — В кн.: Вопросы теории и расчет рабочих процессов тепловых двигателей. № 5. Куйбышев, 1981.
2. В. А. Крутиев и др. Теплоэнергетика, 1976, 10.
3. Хун. Энергетич. машины и установки, 1976, 3, 22.
4. Хун. Там же, 1977, 4, 86.
5. З. А. Саблина. Состав и химическая стабильность моторных топлив. М.: Химия, 1978.
6. Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. Окисление азота при горении. М.: Изд-во АН СССР, 1947.

Поступила в редакцию 21/X 1985,
после доработки — 27/VII 1986

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ХЛОРИРОВАННЫХ ПОЛИЭТИЛЕНОВ

А. С. Мальцева, Г. М. Ронкин, Ю. Е. Фролов,
Е. П. Якушина, А. И. Розловский

(Москва)

Критерии пожароопасности твердых продуктов

При изучении горючих свойств твердых материалов принято измерять следующие параметры: массовую скорость сгорания, скорость распространения зоны горения по поверхности, calorиметрические характеристики сгорания, кислородный индекс, т. е. минимальное содержание кислорода в атмосфере, при котором возможно устойчивое горение, температуры воспламенения и самовоспламенения [1, 2]. Два последние тер-