

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабад Л. М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде.— М.: Медицина, 1973.
2. Ивлиев А. В., Розно В. Г.— В кн.: Горение в потоке/Под ред. А. В. Талантова.— Казань, 1982.
3. Канило П. М. ФГВ, 1984, 20, 5, 64.
4. Беспамятнов Г. П., Кротов Ю. А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде.— Л.: Химия, 1985.
5. Ciajolo A., Barbella R., Mattiolo M. e. a. 19-th Symp. (Intern.) on Combustion. The Comb. Inst., 1982.
6. Лукачев В. П., Кныш Ю. А., Горбатко А. А. и др. Изв. вузов. Авиационная техника, 1981, 3, 94.
7. Алабин М. А., Ройтман А. Б. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных в двигателестроении.— М.: Машиностроение, 1974.

Поступила в редакцию 3/VI 1987
после доработки — 22/X 1987

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. П. Свинухов
(Москва)

Изучение процессов образования загрязняющих веществ при сжигании углеводородных топлив весьма актуально, особенно в связи с перспективой применения новых сортов топлив ухудшенного качества как нефтяного, так и ненефтяного происхождения. Сложившиеся представления о выбросах оксида углерода и несгоревших углеводородов (C_xH_y) и влиянии на них качества топлива сводятся в основном к анализам процессов распыла и испарения топлива и организации топливно-воздушной смеси в зоне горения. Так, увеличение концентраций СО и C_xH_y на режимах малого газа связывают с неудовлетворительным распылом топлива и обеднением топливно-воздушной смеси, а увеличение содержания оксидов азота на максимальных режимах — с ростом температуры пламени, причем эти явления интенсифицируются с переходом на более тяжелые и вязкие топлива с низким содержанием элементарного водорода в топливе.

Попытки создания камер сгорания с ультранизкими концентрациями СО и C_xH_y привели к новым схемам сжигания топлива с предварительным испарением или с пневматическим распылом в сочетании с оптимизацией по коэффициенту избытка воздуха α . Достоинством таких схем сгорания, помимо прочего, является незначительная зависимость коэффициента полноты сгорания η от вида используемого топлива [1]. При этом остается невыясненным вопрос о соотношении СО и C_xH_y с вводом различных топлив при неизменной величине η . Для изучения этого вопроса испытаны различные сорта топлив в двух кольцевых камерах сгорания, работающих в системе малоразмерного газотурбинного двигателя (ГТД). Режим работы двигателя выбирался таким образом, чтобы к фронту горения подавалась полностью распыленная и испаренная смесь топлива с воздухом и различные горючие сгорали с одинаковой полнотой ($\eta = 98\%$). Давление воздуха на входе в камеру $p_k^* = 0,3$ МПа, температура $T_k^* = 400$ К и $\alpha = 1,0$.

Одна из камер сгорания выполнена с завихрителем во фронтальном устройстве, через который пропускаться весь воздух для горения, а вторая имела щелевое фронтальное устройство, подающее $\sim 1/3$ часть воздуха, необходимого для горения топлива, во внешнюю часть факела пла-

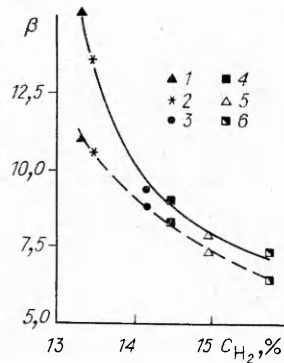


Рис. 1. Зависимость параметра β от содержания водорода в топливе при $\eta = 98,0\%$ в камерах сгорания с завихрителем (сплошная линия) и со щелевым фронтным устройством (штриховая).
Топливо: 1 — дизельное Л-0,2, 2 — Т-6, 3 — ТС-1, 4 — Т-2, 5 — Б-70, 6 — изоктан (C_8H_{18}).

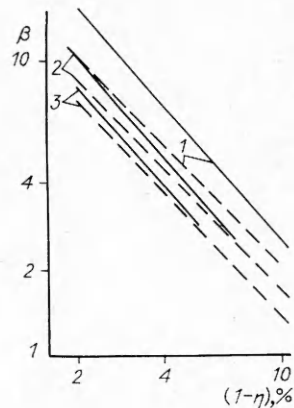


Рис. 2. Изменение параметра β в зависимости от коэффициента неполноты сгорания топлива $(1-\eta)$ (экспериментальные точки не нанесены).
1 — Т-6 (утяжеленный керосин); 2 — РТ (авиационный керосин); 3 — Б-70 (авиационный бензин).

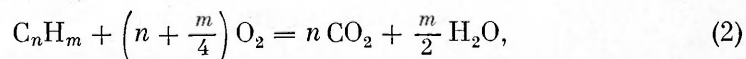
мени с последующим догоранием смеси на струях воздуха. В соответствии с известными представлениями [2], в первой камере сгорания реализовался механизм горения, близкий к кинетическому, а во второй — близкий к диффузионному турбулентному, в силу чего α в зоне реакции горения во второй камере поддерживалась автоматически на уровне 1,0. Пробы отбирались осредняющим 12-точечным пробоотборником с последующим непрерывным анализом CO и CO_2 в ИК-анализаторах, C_xH_y — в пламенно-ионизационном детекторе (ПИД) с водородным пламенем и $NO_x (NO + NO_2)$ — в хемилюминесцентном анализаторе. Система обеспечивала изокинетичность отбора проб и исключала преобразование загрязняющих веществ в пробоотборной магистрали.

Коэффициент полноты сгорания топлива рассчитывался исходя из теплотворной способности недогоревших компонентов по формуле [3]

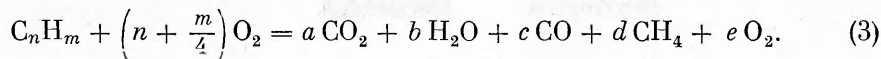
$$1 - \eta = 24 \cdot 10^{-3} [EI_{CO} + 4,83EI_{C_xH_y}], \quad \% \quad (1)$$

где EI_{CO} и $EI_{C_xH_y}$ — индексы эмиссии CO и C_xH_y , представляющие собой отношения ингредиентов CO и C_xH_y в граммах к килограмму сгоревшего топлива. При этом величина $EI_{C_xH_y}$ определялась в эквиваленте метана.

Результаты испытаний представлены на рис. 1 в виде зависимости величины $\beta = EI_{CO}/EI_{C_xH_y}$ от содержания водорода в топливе (c_{H_2}). Как видно, с уменьшением c_{H_2} при одном и том же η величина β возрастает и, следовательно, происходит рост CO с одновременным падением C_xH_y . Объяснение этому явлению может быть дано с физических и химических представлений. Так, известно, что с уменьшением содержания водорода в топливе увеличивается адиабатическая стехиометрическая температура пламени и, как следствие, возрастает равновесная концентрация CO , вызванная процессами диссоциации. Однако для условий эксперимента увеличение температуры ограничивается ~ 17 К, и понятно, что столь значительное повышение β нельзя объяснить только этим процессом. Полезным оказывается рассмотрение упрощенного механизма горения углеводородного топлива в стехиометрической смеси, представляющего собой уравнение баланса C , H и O . Так, полное сгорание углеводородного топлива (C_nH_m) в стехиометрической смеси может быть выражено соотношением



а неполное сгорание, имея в виду, что СО недоокислилось в CO_2 и есть остаток топлива в эквиваленте метана,



Составляя уравнения баланса относительно С, О и Н и решая их совместно с (1), можно получить

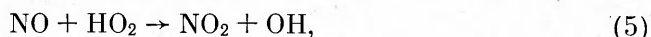
$$\frac{(1-\eta)\mu_{\text{C}_n\text{H}_m}}{24} = e\mu_{\text{CH}_4} \frac{(\beta + 4,83)}{\left(\beta \frac{\mu_{\text{CH}_4}}{\mu_{\text{CO}}} + 4\right)}, \quad (4)$$

где $\mu_{\text{C}_n\text{H}_m}$, μ_{CH_4} и μ_{CO} — молекулярная масса соответственно топлива, метана и оксида углерода. Из (4) видно, что с увеличением молекулярной массы топлива при неизменности коэффициента e величина β также возрастает. Поскольку в реальных топливах, получаемых процессом перегонки из нефтяного или аналогичного сырья, молекулярная масса возрастает при одновременном уменьшении содержания водорода в топливе, то результат, полученный в эксперименте, следует считать закономерным.

Интересно также отметить, что разница в значениях β для различных топлив наблюдается (рис. 2) и при увеличении параметра $(1-\eta)$, вызванного дросселированием двигателя, вплоть до режимов малого газа, когда определяют тепловыделение процессы распыла и испарения топлива.

Таким образом, сжигание в камерах сгорания ГТД, более тяжелых, высокомолекулярных топлив с низким содержанием элементарного водорода при неизменном коэффициенте полноты сгорания топлива η сопровождается увеличением выбросов СО с одновременным снижением концентрации C_xH_y .

Малоизучен вопрос о соотношении оксида и диоксида азота в общей сумме NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$), образующихся при горении углеводородных топлив. Механизм формирования соотношений NO и NO_2 до конца не выяснен, но имеются предположения [4—6], что повышенные концентрации NO_2 в продуктах сгорания турбулентных пламен камер сгорания ГТД объясняются «закалкой» NO_2 по следующей схеме:



NO , образовавшаяся в зоне пламени, из-за наличия большого количества радикалов HO_2 , пик которых приходится на начальный участок пламени, быстро превращается в NO_2 по реакции (5), а дальнейшее разложение NO_2 в NO происходит по реакциям (6) и (7) и во многом зависит от концентрации О, Н и температуры в около- и послепламенной зонах. Поэтому, если заморозить реакции (6) и (7), то следует ожидать повышенный уровень NO_2 , и наоборот.

Турбулентный режим горения топлива в камерах сгорания ГТД и интенсивное перемешивание холодных струй воздуха с продуктами сгорания способствуют замораживанию реакций (6) и (7), и, следовательно, для камер сгорания ГТД на некоторых режимах работы возможны значительные концентрации NO_2 в отличие от двигателей внутреннего сгорания и котельных топок, в которых доля NO в общем балансе NO_x составляет более 90 %. Представляет также интерес результат, полученный в [6], связывающий увеличение NO_2 с присутствием углеводородов в пламени. Вместе с тем имеются сомнения [1, 4] в том, что определяемое с помощью отбора проб соотношение NO и NO_2 истинно, а не получено вследствие преобразований, возникающих в пробоотборной магистрали:



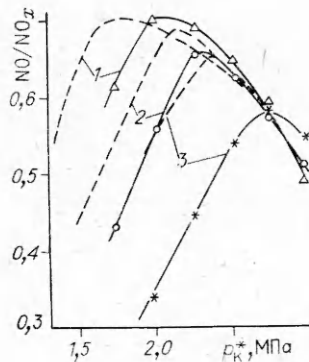


Рис. 3. Зависимость отношения NO/NO_x от режима работы двигателя (экспериментальные точки не нанесены).
1 — В-70; 2 — РТ; 3 — Т-6.

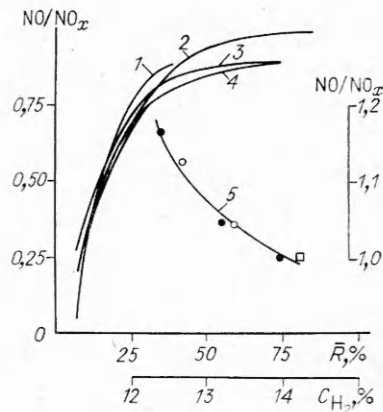


Рис. 4. Зависимость NO/NO_x от тяги двигателя авиационных ГТД (1—4) (экспериментальные точки не нанесены) и относительное (по сравнению с топливом ТС-1) изменение NO/NO_x от содержания водорода в топливе (5).

1 — Д-30; 2 — НК-8-2у; 3 — НК-86; 4 — Д-30КУ; □ — исходное топливо ТС-1; ● — ТС-1 + бензол; ○ — ТС-1 + толуол (\bar{R} — относительная (по сравнению с максимальной) тяга двигателя).

С целью проверки указанных предположений испытаны различные сорта топлив: В-70, РТ и Т-6 (утяжеленный керосин) с добавками ароматических углеводородов и азотсодержащих соединений. Испытательное оборудование осталось без изменения.

На рис. 3 представлено изменение отношения NO/NO_x в функции от приведенного давления воздуха на входе в камеру сгорания (p_k^*), характеризующего режим работы малоразмерного ГТД. При изменении режима работы двигателя $\alpha = 0,95 \div 1,10$.

Для двух исследуемых камер сгорания, реализующих различный механизм горения, отмечается общий характер изменений отношения NO/NO_x с максимумом и со значительным расщеплением характеристик для разных топлив на пониженных режимах работы двигателя. Полученные в эксперименте результаты качественно согласуются с механизмом реакций (5) — (7). Действительно, на низких режимах ($p_k^* < 0,2$ МПа), когда имеет место горение капель топлива, в общем балансе NO_x значение NO низкое, что можно объяснить проскоком горящих капель в зону подвода вторичного (холодного) воздуха, при котором продукты сгорания, образующиеся вокруг капли, сразу же охлаждаются и, следовательно, реакции (6) и (7) замораживаются. По мере увеличения режима работы двигателя размер капель топлива уменьшается, следовательно, меньшая часть их траекторий попадает в холодную зону, величина NO/NO_x повышается. Дальнейшее увеличение режима работы двигателя, когда на процесс горения не оказывают влияния процессы распыла и испарения топлива, сопровождается ростом перепада давления воздуха на жаровой трубе и более глубоким проникновением холодных струй воздуха в камеру сгорания, что интенсифицирует замораживание реакций (6) и (7). Взаимодействие указанных факторов, по-видимому, и определяет наличие максимума NO/NO_x . Влияние свойств топлив на NO/NO_x также удовлетворительно вписывается в рассмотренную схему, так как для более тяжелого и вязкого топлива на одном и том же режиме работы двигателя размер капель, вылетающих из центробежной форсунки, больше и, следовательно, большая часть их траекторий при горении будет соприкасаться с холодными струями воздуха.

Полученные результаты примечательны тем, что они отвергают сомнения в преобразовании NO и NO_2 в пробоотборной магистрали по схеме (8). Действительно, если имеет место реакция (8), скорость которой подчиняется закону Аррениуса, то на одном и том же режиме ра-

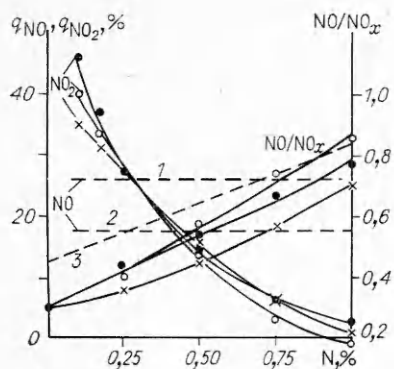


Рис. 5. Изменение NO/NO_x и выхода топливных оксидов азота в зависимости от N.

○ — TC-1 + пиперидин; ● — TC-1 + анилин;
 × — TC-1 + пиридин; 1 — TC-1 + пиперидин;
 2 — TC-1 + пиридин; 3 — камера сгорания со щелевым фронтным устройством (TC-1 + пиперидин).

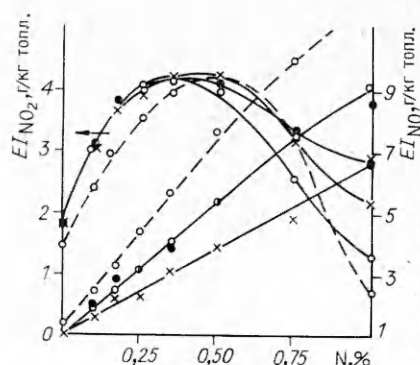


Рис. 6. Изменение выбросов оксидов азота в зависимости от содержания связанного азота в топливе.

○ — TC-1 + пиперидин; ● — TC-1 + анилин;
 × — TC-1 + пиридин; штриховые линии — камера сгорания со щелевым фронтным устройством (TC-1 + пиперидин).

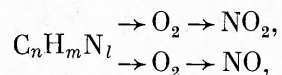
боты двигателя независимо от сорта топлива степень преобразования NO_2 в NO должна быть одной и той же, поскольку параметры газового потока (температура, давление, скорость и т. д.), омывающего пробоотборник, сохраняются неизменными и, следовательно, все условия для протекания реакции (8) примерно одинаковы. Однако эксперимент дает устойчивое отличие в отношении NO/NO_x для разных топлив (левая часть графиков рис. 3). Таким образом, приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о преобразованиях NO_2 и NO в источнике (камере сгорания), а не в пробоотборной магистрали.

Измерения, проведенные на натуральных двигателях самолетов гражданской авиации с использованием топлива TC-1 (типа РТ), также показывают значительное содержание NO_2 в продуктах сгорания на низких режимах работы двигателя, что косвенным образом подтверждает механизм формирования соотношения NO и NO_2 (рис. 4). Однако в последнем случае не зафиксированы максимумы величин NO/NO_x , возможно, потому, что из-за недостаточной прочности пробоотборной магистрали не удалось снять характеристики на высоконагруженных режимах.

В пользу приведенной схемы формирования соотношения NO/NO_x свидетельствует также эксперимент, проведенный в ранее описанной камере сгорания с завихрителем на том же, что и в случае с CO и C_xH_y , режиме работы двигателя с добавками в топливо TC-1 ароматических углеводородов, имитирующих изменение содержания водорода в топливе (см. рис. 4). Так, уменьшение содержания водорода в топливе вызывает увеличение адиабатической стехиометрической температуры пламени и, следовательно, реакции (6) и (7) интенсифицируются, вызывая относительное увеличение (NO/NO_x) по сравнению с исходным топливом TC-1. Попытка сколько-нибудь однозначно связать рост NO_2 вместе с C_xH_y , как это отмечено в работе [6], успехом не увенчалась.

На режимах работы двигателя, описанных в начале статьи, изучалось влияние связанного азота в топливе на образование NO и NO_2 . В качестве азотсодержащих соединений использовались пиридин ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$), пиперидин ($\text{C}_5\text{H}_{11}\text{N}$) и анилин ($\text{C}_6\text{H}_5 \cdot \text{NH}_2$). Идея эксперимента заключалась в том, чтобы не меняя основные условия процесса горения (α , T , p , турбулентность, смешение продуктов сгорания с воздухом) ввести в пламя дополнительное количество оксидов азота, образующихся из топливного азота и проследить их преобразование. Обнаружено, что с увеличением содержания азота в топливе наблюдается рост величины NO/NO_x (рис. 5), причем, как видно из рис. 6, NO непрерывно

увеличивается и, по-видимому, не зависит от изменения NO_2 , а NO_2 претерпевает сильные изменения, вначале увеличиваясь, а затем резко уменьшаясь. При этом, если ввести в рассмотрение величину выхода оксидов азота (a_N), представляющую собой процентное отношение оксидов азота к теоретически возможному их количеству при 100 %-ном переходе топливного азота в оксиды, то выход NO сохраняется неизменным с увеличением N , а выход NO_2 резко падает (см. рис. 5). Анализ экспериментальных данных дает основания полагать, что топливные NO и NO_2 образуются двумя схематичными путями:



причем нижняя ветвь работает самостоятельно и не зависит от выхода NO_2 , а в верхней ветви происходят сложные кинетические превращения, не объяснимые реакциями (5) — (7), и в условиях стехиометрической смеси явно ощущается дефицит кислорода для образования NO_2 .

На основании результатов экспериментальных исследований можно предположить, что соотношение NO и NO_2 на выходе из ГТД есть результат нескольких относительно независимых процессов, происходящих в камере сгорания. Реакции (5) — (7), объясняя влияние топлив, охватывают далеко не все количество NO , образующееся в пламени, и свойственны относительно низкотемпературным пламенам, характерным для режимов работы двигателей, близких к малому газу. Основная доля топливных NO и термических NO , образующихся по механизму Зельдовича, минует стадию быстрого превращения в NO_2 и последующее преобразование в NO . Последним, по-видимому, объясняется очень высокое значение NO/NO_x на высоконагруженных режимах работы авиационных ГТД (см. рис. 4). Окончательная величина концентраций NO и NO_2 будет зависеть прежде всего от того, какая часть NO будет захвачена реакциями превращения (5) — (7), а какая пройдет, минуя их. Дальнейшее изучение процессов образования NO и NO_2 должно быть связано с постановкой корректных модельных экспериментов с как можно более независимым управлением каждым из предполагаемых механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лефевр А. А. Процессы в камерах сгорания ГТД. — М.: Мир, 1986.
2. Теория воздушно-реактивных двигателей/Под ред. С. М. Шляхтенко. — М.: Машиностроение, 1975.
3. Горбатко А. А., Щербаков В. И., Худяков Е. И. и др. Тр. ЦИАМ, № 983.
4. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. — М.: Машиностроение, 1981.
5. Sano T. Comb. Sci. and Technol., 1982, 29, 3—6, 261.
6. Jaasma D., Borman G. Ibid., 1980, 23, 1—2, 83.

Поступила в редакцию 16/III 1987,
после доработки — 22/IX 1987

ПРОСТАЯ ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ВОЗДУХА НА СВЕРХЗВУКОВОЕ ГОРЕНИЕ

С. И. Барановский, А. С. Надворский, Д. Д. Ромашкова
(Москва)

Сверхзвуковое горение в каналах экспериментально исследуется, как правило, в условиях присоединенного воздухопровода на модельных установках, имитирующих требуемые режимные параметры нагревом поступающего воздуха [1]. Наиболее часто используются кауперные, электро-