

можно, учитывая (6), (7) и (14), провести «спрямление» уравнения (12) в координатах $\{Z, T_*^{-1}\}$. Уравнение прямой имеет вид

$$Z = \frac{E}{RT_*} - \ln \left[\frac{Qk}{0,65} \left(\frac{E}{c\rho\lambda R} \right)^{0,5} \right], \quad Z \equiv \ln \left[\frac{1}{T_*} \left(\frac{dT_*}{dt_*} \right)^{-0,5} \right],$$

который позволяет с помощью метода наименьших квадратов вычислить по экспериментальным данным величины E и $Qk(c\rho\lambda)^{-0,5}$. В заключение заметим, что (12) может быть записано в эквивалентной форме

$$\tau_* = \left(\frac{0,65}{p} \right)^2 \int_1^{\Theta_*(\tau_*)} s^2 \exp \left(\frac{2}{\varepsilon s} \right) ds,$$

откуда, ограничиваясь с достаточной для проведения практических расчетов степенью точности первым членом асимптотического разложения интеграла по ε [5], а также учитывая (6), (7), приходим к системе уравнений

$$\left. \begin{aligned} \tau_* &= 0,21 \frac{\varepsilon}{p^2} \left[\exp \left(\frac{2}{\varepsilon} \right) - \Theta_*^4 \exp \left(\frac{2}{\varepsilon \Theta_*} \right) \right], \\ \frac{\sigma - \Theta_*}{\sigma - 1} &= \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \exp(-\mu_n^2 \tau_*), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

определяющей τ_* и Θ_* .

Ниже для иллюстрации приведены результаты числовых расчетов времени задержки зажигания по формулам (14), (16) для сферической частицы топлива марки АП с теплокинетическими константами [6, 7]: $c = 947$ Дж/(кг · К), $\rho = 1,44 \cdot 10^3$ кг/м³, $\lambda = 0,328$ Вт/(м · К), $E = 1,4 \cdot 10^5$ Дж/моль, $Qk = 1,75 \cdot 10^{16}$ Вт/м². Расчеты проводились при $\alpha = 419$ Вт/(м² · К), $T_0 = 303$ К, $R_0 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м.

T_c , К	500	600	700	800
t_* , с	1,3	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	10^{-3}

Авторы признательны А. Э. Аверсону и А. А. Мадояну за интерес к работе и полезные замечания.

Поступила в редакцию 14/VII 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, А. Э. Аверсон. Современное состояние тепловой теории зажигания. М.: Препринт ИФХ АН СССР, 1970.
2. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967.
3. А. Х. Найфэ. Методы возмущений. М.: Мир, 1976.
4. A. Linan, F. A. Williams. Comb. Sci. and Tech., 1974, 3, 91.
5. Э. Я. Риекстыньш. Асимптотические разложения интегралов. Рига: Зинатне, 1974.
6. Теплотехнический справочник. Т. 2/Под ред. В. Н. Юренева. М.: Энергия, 1976.
7. Д. М. Хзмаян, Т. В. Виленский, М. Л. Краснов и др. Теплоэнергетика, 1964, 6, 85.

ЭМИССИЯ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ПРОДУКТАМИ СЖИГАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ

П. М. Канило
(Харьков)

Одно из новых направлений в решении проблемы снижения эмиссий токсичных и канцерогенных веществ с продуктами сжигания углеводородных топлив — применение небольших количеств водорода в качестве дополнительного топлива и распыливающего компонента [1, 2].

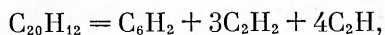
Это направление становится все более актуальным в связи с применением синтетических углеводородных топлив, получаемых, например, из сланцев, углей и обладающих более низким по сравнению с нефтяными топливами водородным показателем, т. е. отношением атомов водорода к атомам углерода (H/C). Указанные синтетические топлива характеризуются также повышенным содержанием полициклических ароматических углеводородов.

Учитывая широкие концентрационные пределы и скорость сгорания, низкую энергию воспламенения, высокий коэффициент диффузии и малую молекулярную массу водорода, его можно эффективно использовать в качестве распыливающего компонента и добавки, инициирующей процесс сгорания основного углеводородного топлива и ингибирующей процессы образования канцерогенных веществ. Это открывает возможность принципиально нового подхода к организации малотоксичных способов сжигания топлив и рабочих процессов тепловых двигателей, в том числе газотурбинных (ГТД).

С отработавшими газами тепловых двигателей на углеводородных топливах наряду с другими вредными веществами выделяются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Вопросы канцерогенного действия ПАУ подробно рассмотрены в работах [3, 4]. Несмотря на многообразие канцерогенных веществ, образующихся при горении органических топлив, присутствие их в продуктах сгорания и воздухе обычно оценивается по наличию бенз(а)пирена (БП). Последний используется в санитарной практике в качестве индикатора присутствия канцерогенных веществ в воздухе, продуктах сгорания, воде, почве и т. д., так как он является самым распространенным в окружающей среде канцерогенным веществом и легко выявляется по характерному спектру флуоресценции [5]. Бенз(а)пирен в нормальных условиях находится в виде твердых кристаллов желтого цвета, температура плавления и кипения соответственно 452 и 783 К.

Исследования эмиссионных характеристик карбюраторных, дизельных и газотурбинных двигателей при работе на высококачественных нефтяных топливах показывают, что концентрация БП в отработавших газах находится на уровне 0,5—20 мкг/м³, т. е. в количественном отношении значительно меньше других нормируемых токсичных веществ. Но предельно допустимая концентрация БП в атмосферном воздухе ($0,1 \cdot 10^{-5}$ мг/м³) в $85 \cdot 10^3$ раз меньше, чем для окислов азота (NO_x). Кроме того, следует отметить, что вредные действия канцерогенных веществ, например, совместно с NO_x резко возрастают.

Механизм образования БП в условиях неполного сгорания топлива пока в достаточной степени не выяснен. При сжигании компоненты топлива подвергаются газификации и высокотемпературному пиролизу. В процессе пиролиза паро- и газообразные продукты содержат в своем составе различные высокомолекулярные углеводороды, в том числе и многоядерный углеводород БП. Образование БП возможно также в результате синтеза. Вероятно, синтезом можно объяснить эмиссию БП при горении низкомолекулярных газов в камерах сгорания. Следует отметить, что имеются достаточные основания ожидать участия ацетиленов и его гомологов в процессах синтеза БП. Углеводороды типа C₂H₂ при высоких температурах претерпевают процесс удлинения цепи, приводящий к образованию соединения с углеводородными скелетами C₆H₄, которые в результате циклизации и дегидрации могут превращаться в БП и другие канцерогенные вещества. В [6] общее стехиометрическое уравнение образования БП выглядит так:



где C₆H₂ — полирадикал, представляющий собой зародыш сажи; C₂H₂ и C₂H — элементарные строительные блоки. В условиях пониженных температур (ниже 1270 К) основным строительным блоком при образовании БП является дифенил C₁₂H₁₀. Для построения молекулы БП

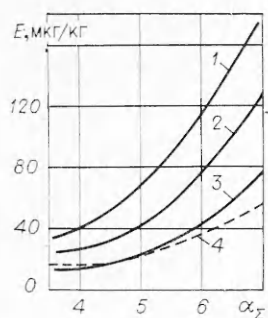


Рис. 1.

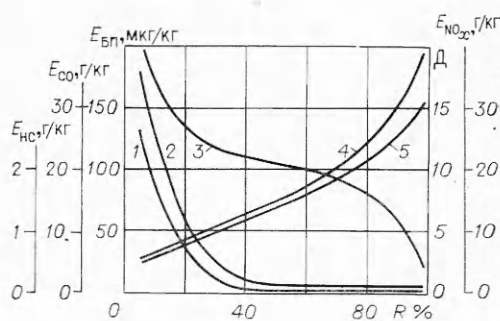
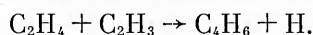


Рис. 2.

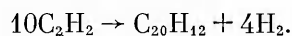
достаточно одной молекулы дифенила и двух молекул дивинила. Последний получается по радикально-цепной реакции из этилена



Дивинил вступает в реакцию с дифенилом



Балансовое уравнение процесса образования БП из ацетилена можно записать так:



При пиролизе метана это уравнение преобразуется к виду



Перейдем к анализу экспериментальных данных. Определение концентрации БП и других ПАУ в продуктах сгорания различного типа газотурбинных двигателей проводили по методикам [7, 8]. Ниже представлены результаты экспериментальных исследований эмиссии ПАУ с отработавшими газами вспомогательного ГТД типа АИ-9, автомобильного ГТД регенеративного цикла и ГТД с высокой степенью сжатия воздуха в компрессоре. Установлено, что рост эмиссии БП с продуктами сжигания углеводородных топлив наблюдается как при переобогащении, так и переобеднении горючей смеси. На рис. 1 показаны уровни эмиссии БП с отработавшими газами (на единицу массы топлива) ГТД типа АИ-9 при работе на дизельном топливе ДЗ ГОСТ 4749—73 в зависимости от частоты вращения ротора турбокомпрессора (n) и суммарного коэффициента избытка воздуха в камере сгорания (α_z), где линии 1—3 соответствуют частоте вращения 36 500, 33 230 и 28 340 мин⁻¹. На рис. 1, 4 представлены данные по эмиссии БП с продуктами сгорания топлива типа РТ в отсеке кольцевой камеры газотурбинного двигателя при температуре и скорости воздуха на входе в отсек 473 К и 115 м/с [9]. Из рассмотренных кривых следует, что минимум эмиссии БП лежит в области $\alpha_z \approx 4$.

В таблице приведены результаты по уровням эмиссии различных ПАУ с отработавшими газами ГТД типа АИ-9 на режиме: $n = 36\,500$ мин⁻¹; мощность $N = 22,5$ кВт; $\alpha_z = 4,8$, расход топлива $0,0148$ кг/с, давление и температура воздуха на входе в камеру сгорания равны соответственно $2,13 \cdot 10^5$ Па и 416 К, температура отработавших газов 873 К. Видно, что индекс эмиссии БП среди исследуемой группы ПАУ составляет $\sim 1\%$.

На рис. 2 приведены результаты исследований уровней эмиссии нормируемых токсичных веществ: 1 — несгоревших углеводородов (НС), 2 — окиси углерода (СО), 4 — дыма (Д), 5 — окислов азота (NO_x), а также БП (3) с отработавшими газами газотурбинного двигателя с высокой степенью сжатия воздуха в компрессоре при работе на керосине. Из представленных данных следует, что максимальные уровни индекса эмиссии БП соответствуют режимам малого газа ($\sim 7\% R_0$), т. е. режи-

ПАУ	Показатели эмиссии ПАУ			
	C_i , мкг/м ³	EI_i , мкг/кг	g_i , мкг/(кВт·ч)	$\bar{C}_i$, %
Флуорантен	25,3	1339,4	3174,4	30,9
Пирен	4,4	234,0	554,7	5,4
Бенз(а)антрацен	0,6	30,7	72,8	0,7
Хризен	18,8	993,2	2353,9	22,9
Бенз(а)флуорантен	9,2	487,1	1154,3	11,2
Бенз(е)пирен	1,5	81,0	192,0	1,9
Бенз(а)пирен	1,0	54,0	128,0	1,2
Перилен	0,4	21,2	50,2	0,5
Инденотриен	6,9	366,9	869,5	8,5
Дибенз(а, h)антрацен	0,8	41,3	97,9	1,0
Бенз(ghi)перилен	9,6	507,7	1203,2	11,7
Коронен	3,3	176,3	417,8	4,1
Сумма	81,8	4332,8	10268,7	100

мам с максимальной неполнотой сгорания топлива. Однако максимальная эмиссия БП в единицу времени характерна для крейсерских режимов ($\sim 0,85R_0$). Следует также указать на относительный показатель вредности, представляющий собой отношение концентрации каждого из рассмотренных вредных веществ к предельно допустимым концентрациям в атмосферном воздухе, т. е. $B_i = C_i/[C_i]$. Учитывая, что концентрация БП среди исследованной приоритетной группы ПАУ в отработавших газах ГТД составляет 1,2%, усредненный показатель вредности ПАУ будет выше, например, соответствующего показателя для окислов азота.

Один из эффективных способов снижения эмиссии БП и других ПАУ — насыщение водородом зоны пиролиза углеводородного топлива, т. е. повышение водородного показателя топливной смеси $(H/C)_\Sigma$. Добавка водорода, с одной стороны, инициирует процесс горения в камере, а с другой — ингибирует процесс образования ПАУ и зародышей сажи. При этом целесообразно использовать энергию сжатого водорода для распыливания основного углеводородного топлива.

На рис. 3 представлены экспериментальные данные зависимости концентрации БП (кривые 1—3) в отработавшем газе автомобильного ГТД при работе на дизельном топливе от показателя $(H/C)_\Sigma$, где частота вращения вала тяговой турбины и эффективная мощность равны соответственно: 1 — 1550 мин⁻¹, 80 кВт; 2 — 1200 мин⁻¹, 95 кВт; 3 — 922 мин⁻¹, 91 кВт.

Для углеводородоводородной топливной смеси

$$(H/C)_\Sigma = (H/C)_r \left[1 + \frac{1}{g_{H_2}(1/g_{H_2} - 1)} \right],$$

где $(H/C)_r$ — отношение атомов водорода к атомам углерода в исходном углеводородном топливе (для дизельного топлива $(H/C)_r = 1,82$); g_{H_2} — массовая доля водорода в исходном углеводородном топливе. Массовая доля добавки водорода определяется по соотношению

$$g_{H_2} = \frac{G_{H_2}}{G_r + G_{H_2}},$$

где G_{H_2} , G_r — массовый расход соответственно водорода и углеводородного топлива.

При экспериментальных исследованиях водород подавался в зону горения по внешнему кольцевому каналу механической форсунки, но не использовался для распыливания дизтоплива. На рис. 3 приведены также результаты по степени загрязнения фильтра (Z_f), через который пропусклась отбираемая на анализ проба газа.

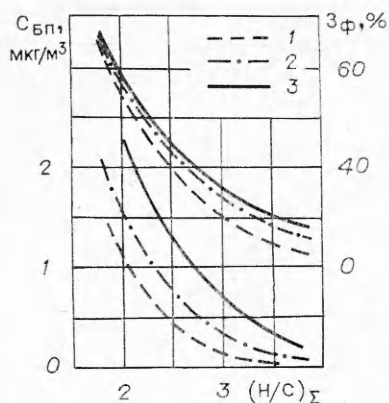


Рис. 3.

дизельного топлива. На рис. 4 приведены также уровни концентрации сажи в продуктах сжигания углеводородных топлив (кривая 1) от $(H/C)_T$ [10].

Результаты проведенных исследований показывают, что существенное снижение эмиссии ПАУ с отработавшими газами двигателей может быть достигнуто при реализации прогрессивных способов сжигания жидких углеводородных топлив, в том числе с применением небольших добавок водорода в камеру сгорания.

Поступила в редакцию 29/III 1983,
после доработки — 4/VIII 1983

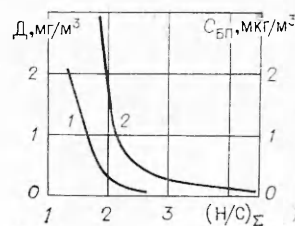


Рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. М. Канило, А. П. Малеваний, А. А. Никишов. — В кн.: Защита воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами транспортных средств. Т. 1. Харьков, 1977.
2. П. М. Канило. Токсичность ГТД и перспективы применения водорода. Киев: Наукова думка, 1982.
3. Э. Клар. Полициклические углеводороды. М.: Химия, 1971.
4. Л. М. Шабат. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. М.: Медицина, 1973.
5. Л. М. Шабат, Г. А. Смирнов, А. Я. Хесина. — В кн.: Защита воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами транспортных средств. Т. 1. Харьков, 1977.
6. Н. В. Лавров, Э. И. Розенфельд, Г. П. Хаустович. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. М.: Металлургия, 1981.
7. П. П. Дикун, А. Я. Хесина. Методические указания по качественному и количественному определению канцерогенных полициклических ароматических углеводородов в продуктах сложного состава. М.: Онколог. науч. центр АМН СССР, 1976.
8. П. М. Канило, В. П. Рябека, А. П. Малеваний и др. Результаты исследований канцерогенных веществ с отработавшими газами газотурбинных двигателей. Препринт АН УССР. Ин-т. пробл. машиностроения, № 98, Харьков, 1981.
9. А. В. Ивлиев, В. Г. Розно. — В кн.: Вопросы прикладной механики в авиационной технике. Куйбышев, 1981. Деп. ВИНТИ, № 1240—81.
10. D. W. Naegeli, C. A. Moses. Effects of fuel properties on soot formation in turbine combustion. SAE Techn. Pap. Ser., N 78-1026, 1978.

МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ ПРИ ОБДУВЕ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИЕЙ

В. К. Булгаков, А. М. Липанов

(Ижевск)

Современная теория горения твердых топлив при обдуве, например [1, 2], использует для описания процессов турбулентного тепло- и массопереноса в зоне горения газовой фазы зависимости теории турбулент-