

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. ФГВ, 1971, 7, 4, 163.
2. Виллюнов В. Н. Докл. АН СССР, 1961, 136, 2, 381.
3. Булгаков В. К., Липанов А. М. ФГВ, 1984, 20, 5, 68.
4. Раздан М. К., Куо К. К. РТК, 1982, 20, 2, 134.
5. Зельдович Я. Б. Химическая физика и гидродинамика.— М.: Наука, 1984.
6. Коэн Н. С. РТК, 1980, 18, 4, 186.
7. Германс. РТК, 1966, 4, 9, 160.
8. Булгаков В. К., Липанов А. М., Камалетдинов А. Ш. Хим. физика, 1986, 5, 6, 831.
9. Булгаков В. К., Липанов А. М. Хим. физика, 1986, 5, 4, 548.
10. Launder В. Е., Spolding D. В. Mathematical models of turbulence.— N. Y.: Academic Press, 1972.
11. Себечи Т., Чэнг К. К. РТК, 1978, 16, 7, 115.
12. Самарский А. А. Теория разностных схем.— М.: Наука, 1977.

Поступила в редакцию 1/XII 1986,
после доработки — 21/VIII 1987

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ОБРАЗОВАНИЯ БЕНЗ(А)ПИРЕНА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГТД

*Ю. А. Кныш, А. А. Горбатко, А. В. Ивлиев, С. В. Лукачев, В. Г. Розно
(Куйбышев)*

Канцерогенные свойства продуктов сгорания авиационных топлив установлены около двадцати лет назад [1]. Обусловлены они (как и в случае сжигания топлив нефтяного происхождения в двигателях автомобилей, промышленных топках, котельных и т. д.) наличием среди несгоревших углеводородов многоядерных соединений, в частности полициклического ароматического углеводорода бенз(а)пирена (БП), который принято считать индикатором канцерогенной активности. Вместе с тем закономерности образования и выбросы с отработавшими газами канцерогенных веществ оставались для авиационных двигателей практически полностью неизученными. Не отработаны и методы исследования, хотя в отношении выброса (эмиссии) сажи (дым), окиси углерода, окислов азота и суммарного выброса углеводородов такие исследования и соответствующие методы получили широкое развитие. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования образования БП применительно к авиационным газотурбинным двигателям.

В санитарно-гигиенических исследованиях в промышленности БП обычно улавливают специальными фильтрами из ткани Петрянова (АФА) с последующей горячей экстракцией фильтров бензолом в аппаратах Сокслета. Для измерения содержания БП в растворе бензола существует хорошо отработанный метод с использованием квазилинейчатых спектров Шпольского. Но для отработавших газов авиадвигателей этот метод не давал хороших результатов из-за того, что фильтр АФА улавливал лишь часть содержавшегося в пробе БП, поэтому была разработана обогреваемая до 443 ± 5 К линия отбора проб, а устанавливаемый в термостате с температурой 333 ± 5 К фильтр изготовлялся из двух-трех слоев очищенного материала Ватман-4 или из такого же количества ткани Петрянова в комбинации с Ватманом-4. С целью предотвращения загрязнения линии продуктами сгорания в промежутках между отборами проб проводилась обратная продувка линии отбора нейтральным газом — азотом или гелием [2]. В измерительной системе применялся спектрометр ДФС-24.

В качестве объектов исследования использовались одиночные вихревые горелки, многгорелочные отсеки камеры сгорания и полноразмерный блок трубчато-кольцевой камеры сгорания, проведены также испытания натуральных двигателей. Один из двигателей работал на природном

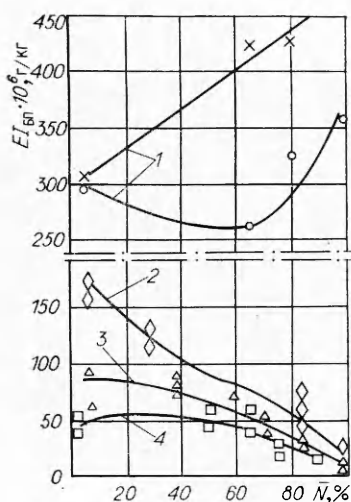


Рис. 2. Содержание БП в топливе РТ при его нагреве в трубопроводе из стали X18H10T (1) и в воздушном потоке без горения (2).

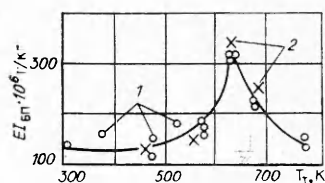


Рис. 1. Удельный выброс БП для некоторых газотурбинных двигателей.

1 — ГТД по данным [1]; 2 — ГТД по данным [3]; 3 — при работе двигателя на керосине; 4 — при работе двигателя на природном газе.

газе, более 96 % которого по объему составлял метан. Остальные объекты работали на авиационном керосине. При испытании одиночных горелок пробы отбирались охлаждаемыми пробоотборниками из локальных зон факела пламени. При испытаниях полноразмерных двигателей, отсеков и блока камеры сгорания система отбора осредняла пробу продуктов сгорания по выходному сечению. Результаты измерений содержания БП в отработавших газах представлялись в граммах БП, образовавшегося при сгорании килограмма топлива (так называемый индекс эмиссии EI).

Полученные зависимости удельного выброса БП от режима работы авиационного двигателя (по величине относительной тяги или мощности) N показаны на рис. 1. Воспроизводимость измерений устанавливалась путем проведения испытаний тех же двигателей через 1—2 дня.

Анализ рис. 1 позволяет отметить некоторые закономерности по выбросу БП авиационными ГТД:

удельные выбросы БП у современных двигателей значительно ниже, чем у двигателей первого поколения [1];

при работе двигателя на керосине выход БП выше, чем в случае использования в качестве топлива природного газа;

при более высоком уровне термодинамических параметров рабочего тела в [3] выше и индекс эмиссии БП;

с увеличением режима работы (относительной тяги или мощности) двигателя удельный выход БП, как правило, снижается;

проведенные в настоящей работе измерения и результаты [3] показывают, что выбросы БП, вообще говоря, не коррелируют с выбросами дыма, HC , CO и NO_x .

Полученные данные свидетельствуют о том, что содержание БП в выхлопе авиационных двигателей исчисляется микродами (50—150 мкг на 1 кг сожженного топлива). Однако учитывая чрезвычайно жесткие санитарно-гигиенические требования по предельно допустимым концентрациям (ПДК) БП для атмосферного воздуха рабочей зоны (ПДК БП на 4 порядка меньше, чем окислов азота [4]), снижение выбросов БП авиационными двигателями безусловно актуальная задача. Ее решение требует исследования более простых объектов — горелок, отсеков и моделей камер сгорания.

Рассмотрим результаты модельных экспериментов.

Начальное содержание БП в авиационном керосине составляло 0,1—0,15 мкг/мл, что соответствует $EI_{БП} = 100 \div 150$ мкг/кг топлива. При нагреве во время движения топлива по горячему коллектору или в процессе распыления нагретым воздухом содержание БП в топливе существенно возрастает (рис. 2). Причем независимо от способа нагрева

Таблица 1

r_{12} при T_B^* , К	БП — НС		БП — СО		БП — η	
	1	2	1	2	1	2
343	0,147	0,993	-0,507	0,833	-0,981	-0,983
453	0,843	0,988	-0,261	-0,248	-0,884	-0,976
563	0,739	0,9996	-0,537	-0,674	-0,756	-0,971
	(-0,0274)	(0,996)	(0,161)	(-0,17)		
673	0,967	0,998	-0,796	-0,716	-0,93	-0,926

Примечание. Коэффициенты корреляции определялись в соответствии с [7]. В скобках — данные с диффузором. η — полнота сгорания топлива. 1 — расчет по всей длине, 2 — без первого сечения.

максимальное содержание БП наблюдается при $T = 620$ К (на выходе из коллектора $T_{\max} = 670$ К, а $T_{\text{воз}} = 770$ К).

В открытом факеле пламени вихревой горелки серийного авиационного ГТД БП интенсивно образуется на начальном участке факела (рис. 3) (здесь относительная длина факела L дана в калибрах минимального сечения сопла конфузорного насадка горелки, $d_c = 14$ мм). Уровень содержания БП возрастает с понижением температуры поступающего в горелку воздуха и достигает примерно 40 000 мкг/кг топлива при $T_{\text{воз}} = 343$ К. Во вторичной зоне БП догорает. Корреляционный анализ показывает, что в области интенсивного образования БП на начальном участке пламени содержание БП не коррелирует с содержанием СО и суммы углеводородов НС, в то время как в зоне догорания наблюдается связь между содержанием БП, СО и НС. Значения коэффициентов парной корреляции r_{12} , рассчитанные по полученным экспериментальным данным, представлены в табл. 1. Отсутствие корреляции между БП и другими продуктами неполного сгорания на начальном участке и высокий уровень корреляции в зоне догорания подтверждаются результатами (табл. 2) обработки экспериментальных данных работы [5], в которой проведено исследование факела пламени вихревой горелки аналогичной схемы.

Таким образом, суммарное содержание БП в продуктах сгорания в сильной степени зависит от эффективности процесса догорания во вторичной зоне камеры. На предсрывных режимах, когда догорание во вторичной зоне резко ослабевает, отмечается аномально высокий выход

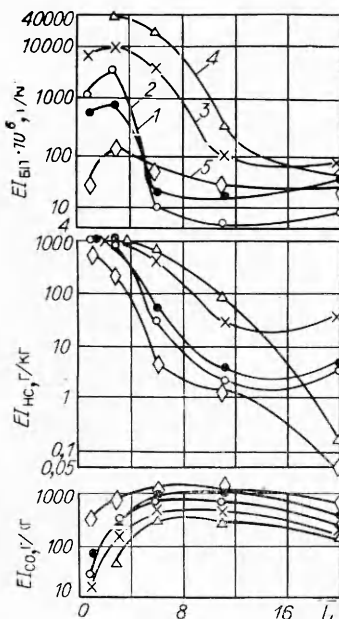


Таблица 2

Компоненты	r_{12}	
	По всей длине	Без первых трех сечений
БП — НС	0,37	0,942
БП — C_2H_2	-0,303	0,469
БП — C_2H_4	0,809	0,995
БП — CH_4	0,084	0,784
БП — СО	-0,785	-0,502

Рис. 3. Распределение продуктов недожога по длине факела пламени вихревой горелки ($\Delta p_B = 1500$ Па, $\alpha = 0,3$).

T_B^* , К: 1 — 673, 2 — 563, 3 — 453, 4 — 343, 5 — 563, горелка с диффузором.

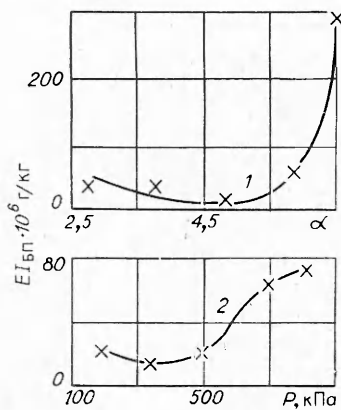


Рис. 4. Зависимость выхода БП от коэффициента избытка воздуха и давления.

1 — $T_B^* = 500 \text{ К}$, $p_B^* = 370 \text{ кПа}$, $\lambda_B = 0,26$; 2 — $T_B^* = 433 \text{ К}$, $\alpha = 4,5$, $\lambda_B = 0,26$.

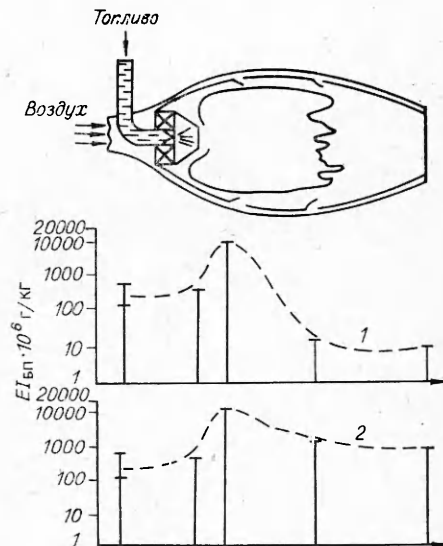


Рис. 5. Примерное содержание БП по тракту камеры сгорания.

1 — расчетный режим; 2 — предсрывный режим.

БП с продуктами сгорания в количествах, примерно равных его максимальному содержанию в первичной зоне открытого факела горелки. Так, при испытании отсека камеры на режиме, близком к границе бедного срыва ($T_B = 240 \text{ К}$, $\alpha = 5 \div 5,5$), $EI_{БП} = 10\,000 \div 40\,000 \text{ мкг/кг}$ топлива.

На рис. 4 представлены зависимости выхода БП от среднемассового состава смеси и давления, полученные в эксперименте на блоке полноразмерной трубчато-кольцевой камеры сгорания. При испытаниях моделировались условия работы камеры в составе двигателя на режимах от малого газа до крейсерского. Зависимость $EI_{БП} = f(\alpha)$ носит типичный характер. Для всех исследованных конструктивных вариантов горелок, отсеков и блоков камер сгорания (см., например, [6]), как и в данном случае, наблюдалось наличие оптимального состава смеси, при котором выход БП достигает минимума. Рост давления в диапазоне 300—800 кПа приводил к увеличению выхода БП.

Представленный экспериментальный материал позволяет предложить следующую феноменологическую схему образования БП в камерах сгорания авиационных ГТД. Заметные количества БП содержатся в реактивном топливе. При подогреве его в коллекторах и в процессе пневматического распыливания концентрация БП может еще в 2—3 раза увеличиться (рис. 5). В первичной зоне факела, где завершаются предпламенные процессы, резко возрастает содержание БП и достигает 10—40 мг/кг топлива. Механизм столь интенсивного процесса синтеза БП в прикорневой области факела остается неясным. Особой сложностью в этой области отличаются процессы тепло- и массообмена и химического реагирования и гидродинамические процессы, формирующие течение реагирующей двухфазной смеси. Корреляция между образованием БП и СО, содержанием суммы углеводородов в этой зоне отсутствует.

Во вторичной зоне факела БП интенсивно выгорает наряду с другими горючими составляющими. Здесь отмечается явно выраженная корреляция между содержанием БП, СО и НС. При неблагоприятных режимах работы камеры сгорания, например на предсрывном режиме (см. рис. 5, 2), образовавшиеся в начальной зоне факела большие количества БП не успевают выгорать во вторичной зоне и выбрасываются с продуктами сгорания.

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 пропускался 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-