

15. Лукачев С.В., Ковылов Ю.Л., Цыганов А.М. Элементы методологии проектирования и теории камер сгорания ГТД, ГТУ (в этом выпуске).
16. О формировании полей температуры газа на выходе из прямоточных камер сгорания малоразмерных ГТУ. / Абрашкин В.Ю., Ланский А.М., Христюк О.В., Шамбан М.А., Файнгаллерин Э.Т. – Газотурбинные двигатели и установки. Тез. докл. на Всесоюзн. науч. конф. М.: МГТУ, 1991. – С.146.
17. Исследование рабочего процесса малоразмерной камеры сгорания: Отчет по НИР (заключ.). КуАИ. Рук. Ланский А.М.. Тема 62-87 № ГР 01870025440. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – 114 с.
18. О некоторых закономерностях взаимосвязи характеристик камер сгорания с качеством распыливания топлива и параметрами смеси. / Диденко А.А., Ковылов Ю.Л., Ланский А.М., Шамбан М.А., Цыганов А.М. – В сб.: «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе». Доклады на междунар. научн.–техн. конф. Самара: СГАУ, 1997. – С.106...113.
19. Лефевр А.Х. Влияние свойств топлива на запуск, устойчивое горение и полноту сгорания топлива в камере сгорания газотурбинного двигателя. – Труды Америк. общества инж.–мех. Сер. А. – М.: 1985, №1. – С.18...32.

УДК 621.452.32.068:543.272.75.05

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫГОРАНИЯ БЕНЗ(а)ПИРЕНА ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ

Лукачев С.В., Матвеев С.Г.

*Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара*

Выброс вредных веществ, содержащихся в отработавших газах ГТД, приводит к значительному локальному загрязнению атмосферы в зоне аэропортов. В настоящее время Международная организация гражданской авиации (ИКАО) нормируют выброс авиационными двигателями 4-х вредных веществ: окиси углерода (СО), несгоревших углеводородов (НС), окислов азота (NO<sub>x</sub>) и дыма (SN) [34]. В то же время известно, что продукты сгорания авиационных топлив обладают канцерогенной активностью [31, 37]. Это связано с тем, что (как и в случае сжигания углеводородных топлив в автомобильных двигателях, промышленных топках, котельных и т.д.) среди несгоревших углеводородов в продуктах сгорания содержатся полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), многие из которых обладают канцерогенной и (или) мутагенной активностью. Индикатором присутствия группы канцерогенных ПАУ принято считать бенз(а)пирен (БП) C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>, который является наиболее активным и стойким канцерогеном. БП – единственное вещество из группы канцерогенных ПАУ, содержание которого в воздухе насе-

ленных мест и рабочей зоны нормируется (с помощью ПДК). Выброс БП с выхлопом авиационных ГТД составляет микродозы  $E_{БП} = 50 \dots 350$  мкг на 1 кг сгоревшего топлива, что на 5...6 порядков меньше выброса нормируемых токсичных веществ (НС, СО, NO<sub>x</sub>). Однако, с учетом того, что ПДК<sub>БП</sub> на 4...6 порядков жестче, чем ПДК токсичных веществ (см. таблицу 1 [7]), ущерб, наносимый окружающей среде за счет выброса БП, сопоставим с ущербом от выбросов СО или NO<sub>x</sub> [10, 31]. Если же принять во внимание тот факт, что помимо БП в выхлопе ГТД содержатся и другие канцерогенные ПАУ, то становится очевидным, что вклад группы канцерогенных ПАУ в общее загрязнение окружающей среды при авиатранспортных процессах может оказаться решающим. В этой связи вопрос о нормировании выбросов БП (как индикатора канцерогенной активности выхлопа) приобретает особую актуальность.

Таблица 1. Предельно-допустимые концентрации вредных веществ

	ПДК вредных веществ, мг/м <sup>3</sup>			
	НС (в пересчете на бензин)	СО	NO <sub>x</sub>	Бенз(а)пирен
В атмосферном воздухе	2,5	1	$0,85 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-6}$
В воздухе рабочей зоны	300	20	5	$150 \cdot 10^{-6}$

Нормы ПДВ (предельно допустимых выбросов) устанавливаются достаточно сложным путем, с учетом как экологической потребности, так и технических возможностей уменьшения выбросов вредных веществ по сравнению с существующим уровнем. Очевидно, что для введения норм ПДВ на БП необходимо провести большой объем работ, включающий создание банка достоверных данных о выбросе БП современными авиационными ГТД и изучение закономерностей образования и выгорания БП в условиях камер сгорания (КС), с целью определения минимального технического достижимого уровня  $E_{БП}$  (нормы ПДВ обычно устанавливаются выше технически допустимого уровня, т.к. КС, помимо экологических, должна удовлетворять целому ряду других требований, обеспечение которых требует принятия компромиссных решений).

В данном обзоре обобщены результаты исследований, выполненных по рассматриваемой тематике к настоящему времени, и намечены направления дальнейшей работы.

## 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ БП В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ

Процедура определения концентрации БП ( $C_{БП}$ ) в отработавших газах (ОГ) состоит из трех этапов: отбор проб ОГ, подготовка пробы к анализу на БП и количественный анализ содержания БП в экстракте пробы. Второй и третий этапы достаточно хорошо отработаны и позволяют определять содержание БП в экстракте пробы с точностью до  $\pm(10...12)\%$  [35, 37]. Наиболее сложным в методическом плане является отбор пробы, так как, именно этот этап несет ответственность за достоверность определения БП в ОГ. Дело в том, что БП находится в ОГ в различном агрегатном состоянии: в виде мельчайшей смолистой аэрозоли, в парообразном состоянии и частично адсорбирован сажевыми частицами [11, 37]. Для получения достоверных значений  $C_{БП}$  необходимо каким-либо образом извлечь из пробы ОГ весь БП. Наиболее распространенными способами извлечения БП из пробы ОГ являются прокачивание пробы через фильтры (ткань Петрянова) или жидкостные поглотители, заполненные бензолом. Однако, эти способы не исключают возможности осаждения части аэрозоля БП и сажевых частиц на внутренних поверхностях элементов системы отбора до фильтра и проскока паров БП через фильтры и ловушки, в результате чего из пробы извлекается лишь часть БП и расчетное значение  $C_{БП}$  оказывается заведомо ниже действительной величины  $C_{БП}$  в пробе ОГ.

В начале 80-х гг. было предложено [9, 10] для отбора проб ОГ на БП использовать систему, аналогичную системе отбора ОГ, рекомендованной ИКАО [34] для определения дымности выхлопа ГТД. Система отбора включала пробоотборное устройство, обогреваемую до  $150...200^{\circ}\text{C}$  линию отбора, имеющую обратную продувку азотом или очищенным сжатым воздухом, и аллонж с пакетом фильтров из ткани Петрянова и материала Ватман-4, термостатированный на  $90^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ . При этом предполагалось, что обогрев линии отбора предотвратит сорбцию БП на внутренней поверхности линии, а охлаждение фильтров до  $90^{\circ}\text{C}$  – исключит проскок паров БП и, таким образом, весь БП, находящийся в пробе ОГ, будет задержан пакетом фильтров. Однако, как показало специально проведенное исследование [29, 33], и эта система отбора не устраняет частичную сорбцию БП в пробоотборниках и линии отбора, а также проскок паров БП через пакет фильтров. Вследствие этого расчетные значения  $C_{БП}$  оказываются заниженными в несколько раз.



В связи с большой актуальностью задачи о достоверном определении выбросов канцерогенных веществ с ОГ авиационных ГТД, Самарским государственным аэрокосмическим университетом (ранее – Куйбышевский авиационный институт) совместно с Центральным институтом авиационного моторостроения (ЦИАМ) было проведено систематическое исследование методических вопросов отбора проб ОГ на БП [25, 28, 29, 33], в результате которого были разработаны способы отбора [1, 3, 28] и соответствующие устройства [2, 28], позволяющие получать достоверные данные о содержании БП (и других ПАУ) в ОГ. Суть разработанных рекомендаций сводится к следующему.

Отбор проб ОГ на каждом режиме работы двигателя необходимо проводить индивидуальной (одноразовой) системой отбора, каждая такая система состоит из необходимого числа пробоотборников, непосредственно за которыми последовательно устанавливаются охлаждаемый водой фильтрующий патрон (со стекловолоконным фильтром) и криогенную ловушку, помещенную в сосуд Дьюара с жидким азотом. При прокачке пробы ОГ через систему отбора аэрозоль БП и сажевые частицы частично сорбируются на внутренней поверхности пробоотборника, а оставшаяся часть задерживается фильтрующими патронами. Пары БП конденсируются в криогенной ловушке и задерживаются фильтром, стоящем на выходе из нее. После окончания отбора пробы ОГ, двигатель останавливают, а систему отбора разбирают и извлекают БП из всех элементов системы (пробоотборников, фильтров, ловушек).

Извлечение БП из элементов системы отбора (этап подготовки пробы к анализу) осуществляется путем их 2-кратной (20+20 минут) ультразвуковой обработки в бензоле [28, 29]. В мировой практике для извлечения БП из материала фильтра широко используется классический способ экстрагирования – 8-часовая обработка фильтра в аппарате Сокслета, при этом в качестве растворителя применяют бензол, толуол или метилхлорид [10, 29, 35, 37]. Отметим, что экстрагирование БП из пробоотборников и ловушек с помощью аппарата Сокслета в принципе невозможно из-за их больших размеров и сложной конфигурации, кроме того ультразвуковое экстрагирование позволяет на порядок снизить время этой процедуры при сохранении той же эффективности извлечения БП [29, 35]. Полученный раствор БП в бензоле концентрируют на ротационном вакуумном испарителе. После этого переходят к заключительному этапу – количественному анализу содержания БП в экстракте пробы.



Для количественного анализа содержания ПАУ в экстракте пробы разработаны и успешно применяются различные методы, которые условно можно разбить на две категории: спектральные и хроматографические. Преимущества и недостатки этих методов подробно изложены в обзоре [35]. В отечественной практике наибольшее распространение получил спектрально-флуоресцентный метод, основанный на эффекте квазилинейчатых спектров флуоресценции ПАУ при температуре жидкого азота (эффект Шпольского) [4, 9, 10, 35, 37]. Применительно к определению содержания БП, молекулы которого имеют ярко выраженный и интенсивный спектр флуоресценции, этот метод обладает особыми преимуществами.

В большинстве случаев не требуется предварительной подготовки экстракта пробы, заключающегося в фракционировании по группам ПАУ, например, с помощью тонкослойного хроматографирования. Кроме того метод обладает очень высокой чувствительностью анализа. Так при использовании спектрометра ДФС-24 обеспечивается чувствительность до  $10^{-10}$  г/мл [28]. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно, т.к. позволяет минимизировать объем пробы ОГ, необходимый для достоверного определения  $C_{БП}$ , и следовательно, уменьшить время гонки двигателя при испытаниях на выброс БП.

Методические рекомендации по отбору и анализу проб ОГ авиационных ГТД на содержание БП [23], разработанные Самарским государственным аэрокосмическим университетом (СГАУ) и ЦИАМ, обеспечивают воспроизводимость результатов не хуже  $\pm 25\%$  при доверительной вероятности 0,95 [29]. Чувствительность метода при использовании спектрометра ДФС-24 не ниже  $1 \cdot 10^{-10}$  кг БП на  $1 \text{ м}^3$  ОГ в случае отбора  $2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$  ОГ.

Из приведенного выше следует, что для получения достоверных данных о содержании БП (и других ПАУ) в ОГ, важнейшую роль играет методика отбора проб ОГ. В этой связи при анализе литературных данных о выбросе БП следует обращать внимание на метод, с помощью которого были получены пробы, т.к. наличие методических ошибок, описанных выше, приводит к значительному занижению результатов определения  $C_{БП}$ .

## *2. ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И ВЫГОРАНИЯ БП В МОДЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ*

Для целенаправленного решения проблемы снижения выброса канцерогенных ПАУ с ОГ ГТД необходимо знать закономерности образования и

выгорания ПАУ. Различными авторами [5, 13, 14] предложены гипотетические схемы синтеза БП, однако они не позволяют проводить даже оценочные расчеты из-за отсутствия констант включенных в них химических реакций. Следовательно, возникает необходимость в детальном экспериментальном исследовании в условиях модельных пламен. Такое систематическое исследование было проведено в СГАУ [17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 26].

На первом этапе решалась задача о выявлении превалирующей роли кинетики или диффузии в процессе синтеза БП при турбулентном горении алифатических углеводородов. В качестве модели был выбран прямоструйный турбулентный диффузионный факел пропана. Результаты исследования [17, 18, 20] показали что:

- зоны интенсивного образования БП при диффузионном сжигании топлива находится в области с местными значениями коэффициента избытка воздуха  $\langle \alpha \rangle_t = 0,1 \dots 0,6$  ( $\langle \alpha \rangle_t$  – осреднение по турбулентной жидкости [6, 12]) и соответствуют зонам максимальной концентрации продуктов пиролиза;
- исчезновение БП происходит при  $\langle \alpha \rangle_t > 1,5$ ;
- подготовка ТВС за счет частичной гомогенизации смеси до ее поступления в зону горения позволяет существенно снизить образование БП;
- уровень концентрации БП зависит как от местного состава ТВС, так и от кинетики протекающих химических реакций.

Следовательно, подходы, основанные на изучении равновесных составов в данном случае не приемлемы, и требуется изучение кинетических особенностей образования БП. При этом по составу ТВС наибольший интерес представляют богатые области горения ( $\alpha < 0,6$ ), где начинается наиболее интенсивный рост БП.

Для получения исходной информации, необходимой для разработки кинетической модели, было проведено исследование процесса образования БП при горении предварительно подготовленной пропановоздушной смеси в прямоочной КС со стабилизацией пламени на решетке. Результаты исследования показали, что:

- характерные времена образования БП составляют величины порядка десятков миллисекунд (рис. 1);

интенсивность образования БП определяется концентрацией продуктов пиролиза исходного топлива (так, образование БП возможно только при  $\alpha < 0,6$ , а с обогащением смеси этот процесс резко интенсифицируется, как показано на рис.2);

- БП является промежуточным продуктом в процессе образования сажистых частиц, количество которых косвенно оценивалось по изменению числа дымности SN (рис.1).

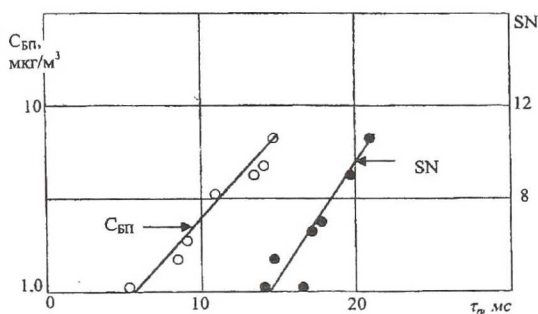


Рис. 1 Изменение концентрации БП и числа дымности при горении предварительно подготовленной пропановоздушной смеси ( $\alpha = 0,535$ ;  $T_0 = 290$  К;  $P_0 = 0,1$  МПа)

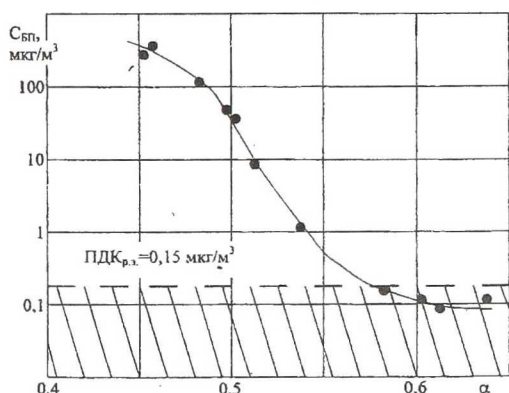


Рис. 2 Влияние состава ТВС на концентрацию БП при горении гомогенной пропановоздушной смеси ( $T_0 = 290$  К;  $\tau_p = 30$  мс)

Исходя из полученных результатов и анализа литературных источников [5, 13, 14, 15, 30, 39] следует, что модель процесса образования БП должна состоять из двух блоков: окисление исходного топлива и синтез молекул ПАУ (в том числе и БП) из несгоревшей части углеводородов. Модель окисления алифатических углеводородов, содержащая около 70 реакций для 25 веществ, была построена на базе кинетической схемы, предложенной в работе [36]. Результаты расчета удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными для условий горения предварительно подготовленных ТВС в широком диапазоне  $\alpha$  ( $\alpha = 0,3 \dots 1,5$ ). Это позволило использовать предложенную схему для расчета концентрации ацетилена [ $C_2H_2$ ], являющегося исходным веществом в процессе синтеза ПАУ.

использовать предложенную схему для расчета концентрации ацетилена [ $C_2H_2$ ], являющегося исходным веществом в процессе синтеза ПАУ.



В соответствии с современным пониманием процесса образования ПАУ БП можно рассматривать как одно из возможных промежуточных веществ в системе химических реакций, приводящих к синтезу сажи. Поэтому моделирование кинетики образования БП должно опираться на модели начальной стадии процесса сажеобразования.

Большинство существующих моделей сажеобразования [38, 39] обладает теми существенными недостатками что-либо приводят к сильно завышенным временам образования полициклических структур, либо используют необоснованно высокие кинетические константы.

Наиболее правдоподобной, с нашей точки зрения, является модель, основанная на карбенном механизме пиролиза ацетилена [40], на базе которой и была построена модель синтеза БП [27]. Поскольку значения констант химических реакций в которых непосредственно образуется БП, неизвестны, единственно надежный способ моделирования его образования – это использование глобальных реакций, параметры которых определяются из эксперимента. Дифференциальное уравнение для концентрации БП в этом случае имеет вид :

$$\frac{dC_{\text{БП}}}{dt} = k_1[C_2H_2]^m - k_2[C_2H_2]^n C_{\text{БП}},$$

где  $C_{\text{БП}}$  – концентрация БП (моль/см<sup>3</sup>). Первое слагаемое в правой части описывает образование БП из  $C_2H_2$ . Второе слагаемое описывает процесс перехода БП в более тяжелые ПАУ и далее в сажу. Константы  $k_1$ ,  $k_2$  определяются из эксперимента, а показатели степени  $m$  и  $n$ , в соответствии с выводами, сделанными в работе [27] имеют порядок  $m \sim 5$  и  $n \sim 2$  и должны быть уточнены опытным путем. Анализ предложенного уравнения показывает, что при условии постоянства концентраций ацетилена ( $[C_2H_2] = \text{const}$ ), скорость роста концентраций БП на начальной стадии пропорциональна  $[C_2H_2]$  в 5-й степени, а предельное значение  $C_{\text{БП}}$  (при стремлении к состоянию равновесия) пропорционально  $[C_2H_2]$  в 3-й степени.

Концентрация БП и других ПАУ в выхлопных газах ГТД определяется как интенсивностью их образования в переобогащенных зонах, так и процессами выгорания этих веществ при наличии свободного кислорода [31]. Для разработки практических мероприятий по снижению выброса БП с ОГ необходимо знать, какие факторы являются определяющими в процессе выгорания БП – кинетические или диффузионные.

В работах [6, 12] показано, что в случае турбулентного диффузионного горения окисление алифатических углеводородов происходит в очень узкой зоне – практически на стехиометрических поверхностях, т.е. выгорания легких углеводородов находятся в диффузионной области и не зависят от кинетических факторов. Нами было сделано предположение, что выгорание БП происходит аналогичным образом. Для проверки этого предположения была разработана специальная экспериментальная установка [22], в которой горение ТВС осуществлялось в две стадии. На первом этапе в прямоточной КС при времени пребывания  $\tau_n \approx 30$  мс и  $\alpha_0 = 0,5$  завершилось образование БП. Затем, в условиях турбулентного диффузионного факела при истечении продуктов неполного сгорания через сопло происходило окисление БП. Таким образом процессы синтеза и выгорания БП были разделены. Анализ экспериментальных результатов проведенный с использованием подходов, изложенных в [12], показал, что как и для алифатических углеводородов, выгорание БП определяется диффузией и не зависит от кинетики протекающих химических реакций [23].

С практической точки зрения полученные результаты означают, что при интенсивном смешении струй вторичного воздуха с продуктами сгорания, поступающими из первичной зоны КС, подавляющая часть БП, образовавшегося в локально переобогащенных зонах должна выгорать. Об этом свидетельствуют и результаты специально поставленного эксперимента, по условиям которого, образование БП завершилось как и в предыдущем случае при  $\alpha_0 = 0,5$  ( $\tau_n = 30$  мс), однако, на выходе вместо сопла устанавливались коллектор для подвода высоконапорных струй воздуха и цилиндрическая камера для выгорания ТВС (рис.

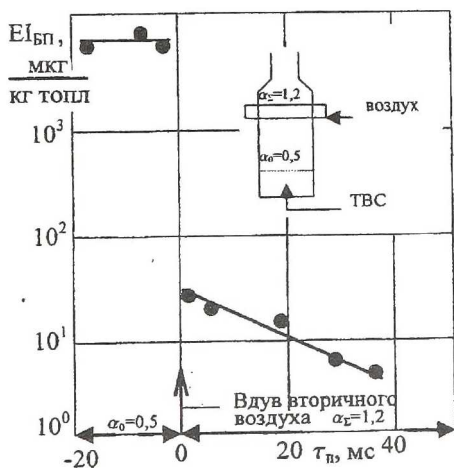


Рис. 3 Выгорание БП в модельной КС при подаче вторичного воздуха ( $\alpha_0 = 0,5$ ;  $\alpha_\Sigma = 1,2$ )

3). При подводе вторичного воздуха суммарное значение составляло:  $\alpha_\Sigma = 1,2$ . Проведенные эксперименты показали, что за время 1...2 мс выход БП в

расчете на 1 кг сгоревшего топлива ( $E_{\text{БП}}$  [мкг/кг топл.]) уменьшается на 2...3 порядка.

Исследование закономерностей образования БП при горении предварительно подготовленных ТВС показало (см. рис.2), что важнейшую роль в этом процессе играет состав смеси ( $\alpha$ ). Из представленных данных следует, что даже при сжигании сравнительно богатых ТВС ( $\alpha = 0,7...0,9$ ) канцерогенные ПАУ не образуются ( $S_{\text{БП}}$  на уровне фона – ПДК для воздуха рабочей зоны). Однако, имеющая место в практических системах сгорания неоднородность смеси и связанные с ней пульсации  $\alpha$  относительно своего среднего значения должны приводить к лавинообразному увеличению концентрации БП. В работе [21] проведена качественная оценка влияния начальной неоднородности на уровень БП в камере сгорания для богатой (в среднем) и стехиометрической ТВС. Оценка выполнена на базе данных, представленных на рис.2. Показано, что в обоих случаях наличие неоднородности ТВС может привести к существенному (на 2 порядка) увеличению  $S_{\text{БП}}$ . Причем, если для богатой смеси  $\langle \alpha \rangle_1 = 0,53$ , такой рост концентрации БП достигается уже при незначительной неоднородности (~10%), то для  $\langle \alpha \rangle_1 = 1$  только при достаточно высоком уровне пульсаций концентрации топлива (~100%).

Для подтверждения данного вывода [24] была разработана двухконтурная модель с отдельным подводом ТВС по контурам (рис.4). Смесь из

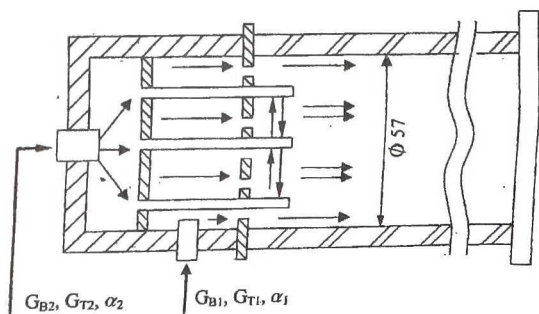


Рис. 4 Экспериментальная установка

первого контура поступала параллельно оси КС, а из второго контура – перпендикулярно. Таким образом, обеспечивалось равномерное распределение продуктов сгорания двух контуров по сечению модели. В ходе эксперимента расход и

средний состав ТВС через модель поддерживались постоянными ( $\langle \alpha \rangle_1 = 0,53$ ). Начальная неоднородность задавалась изменением  $\alpha_1$  (по первому контуру) и  $\alpha_2$  (по второму контуру). Неоднородность задавалась двумя способами. В первом случае (режим А) через второй контур подавался чистый про-



пан, во втором (режим Б) через оба контура поступала гомогенная смесь. Неоднородность обеспечивалась обогащением смеси во втором контуре и, соответственно, обеднением смеси в первом контуре. Предельными случаями для обоих режимов являлись:  $G_{T2}/G_{T0} = 0$  (горение гомогенной однородной смеси);  $G_{T2}/G_{T0} = 1$  (диффузионное горение пропана).

Представленные на рис.5 результаты показывают, что даже незначительный подвод чистого пропана (режим А:  $G_{T2}/G_{T0} = 0,1 \dots 0,2$ ) в высокотемпературные продукты сгорания гомогенной ТВС приводит к резкому возрастанию  $C_{БП}$  на выходе из КС. В условиях режима Б, когда подводимое через второй контур топливо предварительно разбавляется воздухом, такого интенсивного увеличения концентрации БП не наблюдается. Таким образом [24]:

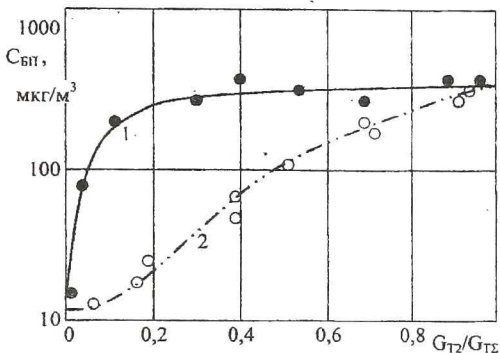


Рис. 5. Зависимость  $C_{БП} / (G_{T2}/G_{T0})$ ;  $\alpha_{\Sigma} = 0,53$ .  
1 – режим А; 2 – режим Б

- неоднородность смеси является важнейшим фактором определяющим образование БП в камере сгорания для данного среднего состава смеси;
- гомогенизация смеси позволяет существенно снизить уровень концентрации БП;

обеднение среднего состава ТВС приводит к снижению фактического уровня  $C_{БП}$  даже при наличии высокой начальной неоднородности.

Согласно современным представлениям [5, 14, 39] ПАУ являются промежуточными продуктами в процессе сажеобразования и могут синтезироваться двумя путями: из легких углеводородов (типа ацетилена), являющихся продуктами термического пиролиза топлива, и путем прямой концентрации ароматических структур, имеющих в исходном топливе. Поэтому химический состав топлива и, в частности, содержание в нем одно- и двух-кольцевой ароматики должно оказывать влияние на интенсивность образова-

ния ПАУ и сажи. Применительно к сажеобразованию это влияние подтверждено многочисленными экспериментами, результаты которых обобщены в монографиях [15, 30]. В частности, достоверно установлено, что интенсивность сажеобразования увеличивается с уменьшением массовой доли  $H_2$  и увеличением содержания ароматики (особенно двухкольцевой) в топливе. Применительно к ПАУ такого систематического исследования не проводилось.

В работе [26] отражены результаты экспериментального исследования по оценке влияния химического состава топлива на образование БП. опыты проводились на цилиндрической КС со стабилизацией пламени на плоской решетке. Распыливание, испарение и смесеобразование осуществлялось до поступления ТВС в модельную КС. Параметры ТВС на входе в модель:  $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $T_0 = 500 \text{ К}$ ,  $\alpha_0 = 0,5$ . Отбор проб производился при времени пребывания  $\tau_{\text{П}} = 10 \text{ мс}$ . В качестве топлива использовались: смесь на основе изооктана с добавками бензола или толуола (до 40% по объему); смесь на основе изооктана с добавками  $\alpha$ -метилнафталина (до 5% по объему).

В результате проведенных исследований установлено, что:

- уровень  $C_{\text{БП}}$  в продуктах сгорания зависит от химического состава топлива;
- для смесевых топлив с однотипными добавками ароматических углеводородов (например: только толуола или только  $\alpha$ -метилнафталина) уровень образования БП определяется процентным содержанием  $H_2$  в топливе (причем, с уменьшением содержания  $H_2$  выход БП увеличивается);
- степень влияния ароматических углеводородов усиливается в следующей последовательности: моноциклические, бициклические, полициклические ароматические углеводороды.

Анализ проведенных исследований и оценочные расчеты с использованием предложенной модели образования БП позволили, в первом приближении, проанализировать влияние давления ( $P_0$ ) и температуры ( $T_0$ ) на входе в КС. Показано, что с увеличением давления в диапазоне  $P_0 = 0,1 \dots 1,0 \text{ МПа}$  уровень образования БП возрастает пропорционально  $P_0^n$  (где  $n$  имеет порядок  $\sim 3$ ). Влияние  $T_0$  неоднозначно, и зависит от состава ТВС и несопоставимо с влиянием  $P_0$ . Отметим, что аналогичные в принципе результаты (по

влиянию  $T_0$ ) получены при исследовании закономерностей сажеобразования при горении предварительно подготовленных ТВС [30].

Результаты, полученные при изучении закономерностей образования и выгорания БП в условиях модельных пламен можно кратко сформулировать следующим образом:

уровни выхода БП при диффузионном горении газообразного топлива определяются как диффузионными процессами, так и кинетикой химических реакций;

характерные времена образования БП (при  $P=0,1$  МПа) составляют величины порядка десятков миллисекунд;

интенсивность образования БП определяется концентрацией продуктов пиролиза исходного топлива (поэтому образование БП, например, при горении предварительно подготовленной пропановоздушной смеси возможно только при  $\alpha < 0,6$ , и интенсивно возрастает при увеличении давления);

- БП является промежуточным продуктом в процессе сажеобразования;

- выгорание БП протекает по тем же закономерностям, что и выгорание легких углеводородов, следовательно, процессы выгорания БП можно описывать в рамках моделей турбулентного смешения без учета влияния химической кинетики;

уровень выброса БП из КС зависит как от интенсивности процессов образования БП в ней, так и от эффективности его выгорания;

- начальная неоднородность ТВС является важнейшим фактором, определяющим образование БП в КС для данного среднего состава ТВС; гомогенизация смеси позволяет существенно (на 2 порядка) снизить уровень концентрации БП; обеднение ТВС приводит к снижению фактического уровня концентрации БП даже при наличии высокой начальной неоднородности;

- использование топлив широкого фракционного состава (с повышенным содержанием ароматики) приводит к интенсификации образования БП.



### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ НАТУРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Здесь мы приводим только те результаты, достоверность которых не вызывает сомнений, поскольку они были получены с помощью усовершенствованной методики отбора проб на БП в соответствии с рекомендациями [28].

На рис. 6 представлено изменение выброса БП ( $E_{БП}$ , мкг/кг топлива) по режиму работы ГТД различных типов: ТРДД-1, ТРДД-2 и ТВД-1 – маршевые

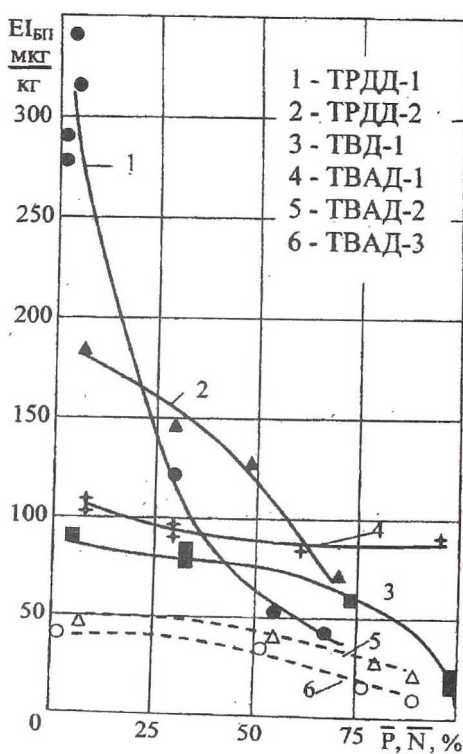


Рис. 6. Изменение выброса БП по режиму работы двигателей:

1, 2, 3, 4 – керосин; 5, 6 – природный газ

авиационные двигатели, ТВАД-2 и ТВАД-3 – конверсированные модификации ТВД-1, работающие в наземных условиях на природном газе в качестве силовых приводов энергоузелов (ТВАД форсирован по мощности в сравнении с ТВАД-2, за счет увеличения  $T_T$ ).

Выброс БП авиационными двигателями во всем диапазоне режимов работы составляет 20...350 мкг/кг топлива (рис. 6). Несмотря на различные абсолютные значения  $E_{БП}$ , для всех обследованных двигателей наблюдаются следующие общие закономерности: увеличение режима работы приводит к монотонному снижению величины  $E_{БП}$ , выброс БП коррелирует с выбросами несгоревших углеводородов и ок-

сида углерода, между  $E_{БП}$  и дымностью выхлопа имеет место отрицательная корреляционная связь (таблица 2).

Таблица 2. Коэффициенты парной корреляции между выбросами БП и других токсичных веществ, а также БП –  $\tau_r$  и БП – SN

№ ПП	Двигатель	Топливо	$K_{\text{БП-К}}$	$K_{\text{БП-СО}}$	$K_{\text{БП-НОХ}}$	$K_{\text{БП-SN}}$	$K_{\text{БП-}\tau_r}$
1	ТРДД-1	Керосин	0,974	0,999	-0,999	-0,957	-0,999
2	ТРДД-2	---	0,707	0,747	-0,902	-0,97	-0,696
3	ТВД	---	0,6832	0,7552	-0,7658	---	-0,728
4	ТВАД-1	---	0,678	0,471	-0,665	---	-0,336
5	ТВАД-2	Природный газ	0,9647	0,8271	-0,6494	---	-0,9173
6	ТВАД-3	---	0,963	0,946	-0,723	---	-0,96

При работе ГТД на природном газе закономерности изменения  $E_{\text{БП}}$  остаются такими же (рис.6, табл.2), как и для авиационных двигателей, работающих на керосине, но абсолютный уровень выброса БП у них существенно ниже. Сравнительный анализ результатов испытаний ТВД-1 и ТВАД-3, имеющих одну и ту же КС (при переводе двигателя на газообразное топливо в КС введено лишь одно изменение – жидкостные центробежные форсунки заменены на струйные многосопловые), показывает (рис.7), что двигатель работающий на керосине, имеет значительно более высокий уровень  $\eta_r$ , и тем не менее величина  $E_{\text{БП}}$  для него в 2...3 раза выше, чем для ТВАД, работающего на природном газе. И лишь на максимальном режиме работы ТВД-1, при  $\eta_r = 99,995\%$ , величина  $E_{\text{БП(ТВД)}}$  снижается до уровня  $E_{\text{БП(ТВАД)}}$ .

Для более полной оценки загрязнения окружающей среды вредными выбросами ГТД необходимо знать спектральный состав АУ в ОГ и степень корреляции выброса отдельных

АУ с выбросом БП при изменении режима работы двигателя. Изучение этих вопросов проводилось при испытаниях ТРДД-1 [32]. Установлено, что в

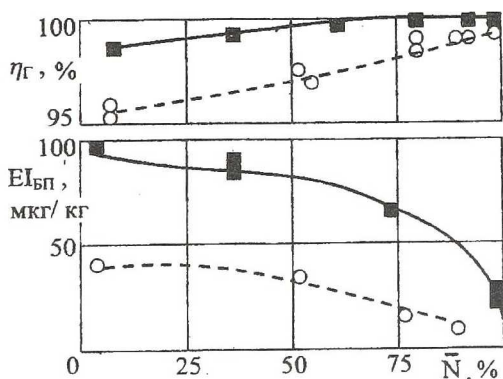


Рис. 7. Изменение полноты сгорания и выброса БП по режиму работы двигателей.  
 ■ - ТВД-1;  
 ○ - ТВАД-3 (природный газ)

ОГ авиационного ГТД спектр ПАУ, обладающих канцерогенной и (или) мутагенной активностью, весьма широк (рис. 8). Причем, зависимости изменения концентраций отдельных ПАУ в продуктах сгорания от режима работы двигателя имеют одинаковую тенденцию (уменьшаются при увеличении режима работы), и в первом приближении соответствуют изменению концентрации БП.

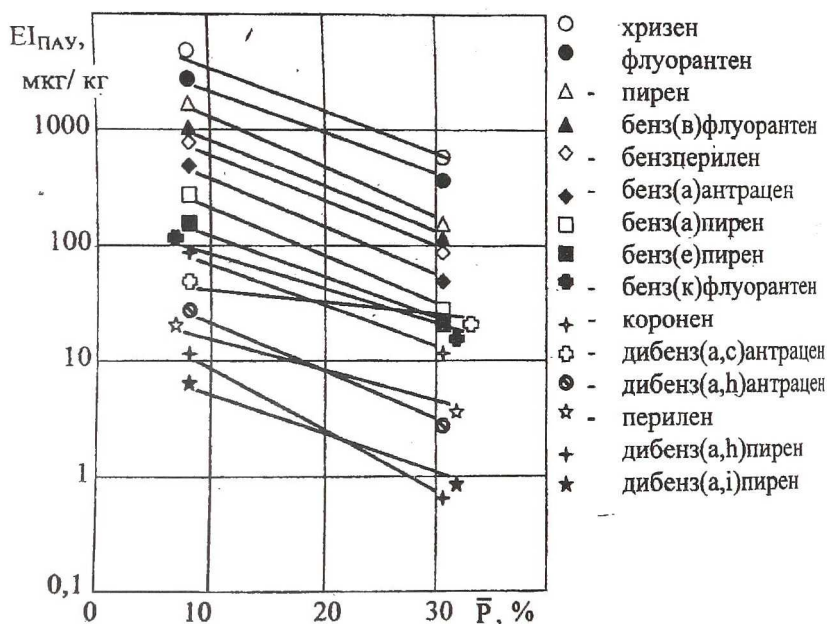


Рис. 8. Изменение выбросов ПАУ по режиму работы двигателя ТРДД-1

Наличие достоверных данных о выбросе БП, наряду с данными о выбросе  $\text{HC}$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$ , позволяет оценить относительный вклад каждого из этих веществ в условную суммарную «вредность» выхлопа  $EI_{\Sigma}^{\text{ПРИВ}}$  на различных режимах работы ГТД. Величина  $EI_{\Sigma}^{\text{ПРИВ}}$  учитывает как абсолютные значения выброса вредных веществ, так и степень их «вредности», последнее обычно [10] учитывается путем сравнения ПДК каждого вещества с ПДК<sub>СО</sub>.

$$EI_{\Sigma}^{\text{ПРИВ}} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot EI_i,$$

где  $k_i = \text{ПДК}_{\text{СО}} / \text{ПДК}_i$ .



При оценке вредности выхлопов для воздуха рабочей зоны (при использовании ПДК рабочей зоны, см. таблицу 1) это выражение приобретает вид

$$EI_{\Sigma}^{\text{прив}} = EI_{\text{CO}} + 0,067EI_{\text{HC}} + 4EI_{\text{NO}_x} + 1,33 \cdot 10^5 EI_{\text{БП}}$$

Относительный вклад каждого вещества в суммарную «вредность» выхлопа оценивается с помощью выражения

$$\overline{EI}_i^{\text{прив}} = \left( k_i \frac{EI_i}{EI_{\Sigma}^{\text{прив}}} \right) \cdot 100\%$$

Результаты такой оценки проведенной для ряда двигателей (рис. 9), показывают, что относительный вклад БП (без учета других концентраций ПАУ) в общую «вредность» выхлопа авиационных ГТД на низких и средних режимах работы составляет 20...40%. Это подтверждает актуальность проблемы снижения выброса БП (и других канцерогенных ПАУ) с отработавшими газами авиационных двигателей.

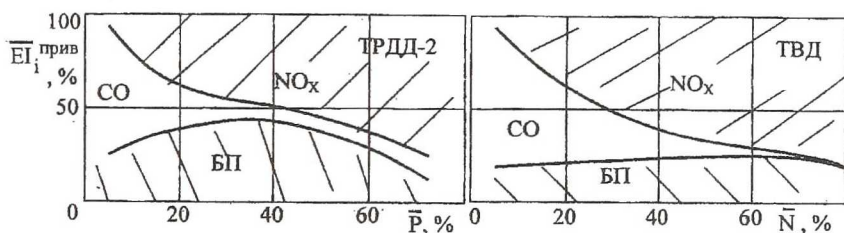


Рис. 9. Изменение относительного вклада вредных веществ в общую вредность выхлопа по режиму работы ГТД

#### 4. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты, полученные при исследовании закономерностей образования и выгорания БП в условиях модельных пламен и при испытаниях натуральных двигателей, позволяют проанализировать особенности протекания этих процессов в КС и выявить пути снижения выброса БП (и других ПАУ) с отработавшими газами ГТД.

В соответствии с современными представлениями, в КС традиционной схемы основная масса топлива сгорает по диффузионному механизму, т.е. высокотемпературные реакции окисления протекают в основном в тонких

слоях вблизи стехиометрических поверхностей, разделяющих «бедные» области, с недостатком топлива, и «богатые» – с его избытком. Как было показано выше в «богатых» областях в условиях дефицита кислорода и высокой температуры (за счет диффузии сюда продуктов сгорания от «стехиометрической» поверхности) идет термический пиролиз топлива с образованием легких углеводородов типа ацетилена из которого затем синтезируются ПАУ и далее – сажа. При смешении в дальнейшем продуктов сгорания «богатых» зон с воздухом происходит выгорание этих веществ. Анализ кинетики окисления интересующих нас веществ показывает, что наиболее быстро протекает окисление углеводородов, включая ПАУ. Медленнее идет доокисление  $CO$  в  $CO_2$  [6], и наибольшее время требуется для протекания гетерогенных реакций окисления частиц сажи [30]. В результате оказывается, что выгорание легких углеводородов и ПАУ лимитируется не кинетикой, а процессами смешения, т.е. находится в диффузионной области (выгорание на «стехиометрических» поверхностях). Выгорание же  $CO$  и сажи, напротив, определяется скоростями химических реакций, т.е. находится в кинетической области. Различие в механизмах окисления ПАУ и сажи объясняет, в частности, наличие отрицательной корреляции между  $EI_{БП}$  и  $SN$  (см. табл. 2).

Уровень выброса ПАУ из КС определяется, таким образом, протеканием двух процессов: интенсивностью образования ПАУ в переобогащенных топливом зонах и эффективностью смешения продуктов, выходящих из этих зон, с вторичным воздухом. Интенсивность процессов смешения в КС авиационного ГТД обуславливается относительными потерями полного давления в ней и поэтому практически не меняется по режиму работы двигателя. Это означает, что скорость выгорания ПАУ по существу остается постоянной на всех этих режимах. Следовательно, уровень выброса ПАУ с ОГ должен почти целиком определяться интенсивностью процессов их образования в «богатых» областях зоны горения.

Исследования, проведенные на модельных пламенах, показывают, что скорость синтеза БП зависит в основном от концентрации продуктов пиролиза исходного топлива. По этой причине, в частности, БП вообще не образуется при горении гомогенной пропановоздушной смеси  $\alpha > 0,6$  (рис.2), а увеличение давления в КС приводит к резкому возрастанию уровня концентрации БП. Показано, также, что образование БП в «богатой» части факела из-за больших характерных времен процесса синтеза БП зависит как от кинетических факторов, так и от интенсивности процессов смешения. Следовательно,

выход БП (и других ПАУ) зависит от особенности организации смешения и горения в первичной зоне КС. В частности, одним из наиболее влияющих факторов оказывается степень неоднородности концентрации топлива в зоне горения, которая определяет наличие здесь областей с высокой концентрацией продуктов пиролиза. В этой связи особо важную роль приобретают процессы распыливания топлива и его распределение по объему первичной зоны, т.к. испаряющиеся капли топлива – главный источник появления больших локальных неоднородностей концентрации топлива. Более того, жидкие капли топлива могут попадать и в «бедную» часть диффузионного факела, на периферию КС, где выгорание испаренного топлива и образования в нем БП затруднено в связи с «замораживанием» химических реакций в холодной пристенке. Работы, проведенные в ЦИАМ, показывают, что именно попадание топлива на периферию КС (в «бедную» область зоны горения) является главным источником появления больших количеств несгоревших углеводородов в выхлопе ГТД. Можно с достаточным основанием предположить, что данный вывод справедлив и в отношении ПАУ.

Для проверки этого предположения проведены внутрикамерные измерения

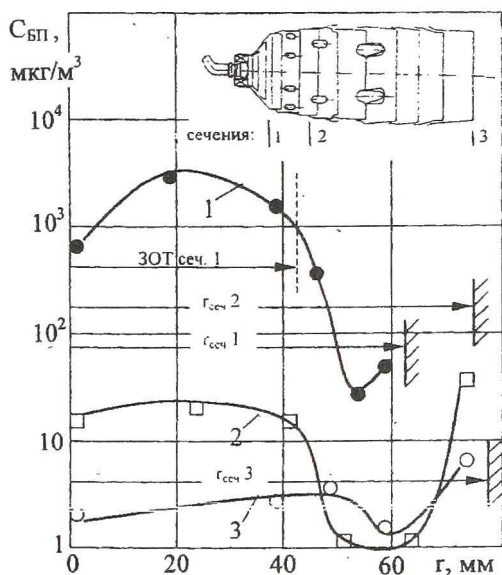


Рис. 10. Изменение концентрации БП по радиусу трубчатой КС (топливо-керосин РТ):  
 ■ - сечение - 1; □ - сечение - 2;  
 ○ - сечение - 3

С<sub>БП</sub> по радиусу трубчатой КС в трех ее сечениях (рис. 10). В виду сложной аэродинамической структуры течения в камере полученные результаты следует рассматривать как качественные. Показано, что максимальные концентрации БП в первичной зоне обратных токов (ЗОТ). Это обусловлено тем, что попадание капель топлива в высокотемпературные продукты реакций с дефицитом

свободного кислорода приводит к повышению в этой области концентрации продуктов пиролиза исходного топлива, в том числе ацетилена, который является основным "строительным материалом" в процессе синтеза БП. В прямом токе наибольшие величины  $C_{БП}$  наблюдаются в области, непосредственно примыкающей к ЗОТ. По мере удаления от ЗОТ (по радиусу камеры) концентрация БП резко падает, а вблизи стенки камеры вновь возрастает. Вдув вторичного воздуха приводит к интенсивному выгоранию БП в ядре потока (кривые 2 и 3, рис. 10). Вблизи же стенки КС снижение величины  $C_{БП}$  происходит только за счет разбавления продуктов сгорания вторичным воздухом, поэтому на выходе из камеры концентрация БП в пристенке в 4...5 раз выше, чем в ядре потока. Оценка, проведенная с учетом радиальных эпюр  $C_{БП}$ , температуры и скорости газа в сечении III, показывает, что относительный вклад пристенка в интегральную величину  $E_{БП}$  на режиме малого газа превышает 50%.

В монографии [30] приведены данные холодных испытаний моделей первичных зон КС (топливо имитировалось водой). Показано, что значительная часть жидкости, подаваемой через форсунки, отбрасывается на периферию и осаждается на стенках КС. При этом относительная масса воды ( $g$ ), осажденной на стенках, различна для разных типов фронтных устройств, но тенденция изменения  $g$  всегда одинакова: с ростом перепада давления ( $\Delta P_k$ ) на модели величина  $g$  уменьшается. Анализ, приведенный в [30], показывает, что аналогичная зависимость имеет место и в условиях реальной КС, хотя абсолютная величина доли топлива, попадающего на стенку, будет существенно меньше. На периферию камеры сепарируются прежде всего крупные

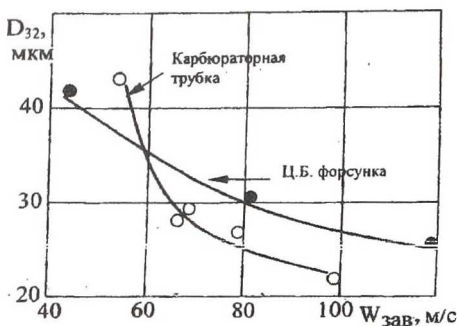


Рис. 11. Зависимость среднего заулеровского размера капель от скорости воздушного потока в завихрителе [30]

капли. Увеличение  $\Delta P_k$  приводит к росту скорости потока в воздушном завихрителе и улучшает дисперсность распыливания [30] (рис. 11), в результате чего доля топлива, отбрасываемого к стенке, снижается.

Результаты испытаний натуральных двигателей хорошо согласуются с разработанными представлениями о зако-



номерностях образования ПАУ в КС и их выброса с ОГ. Так для всех испытанных двигателей наибольший выброс БП ( $E_{БП}$ ) наблюдается на режиме малого газа, для которого характерно низкое качество распыливания топлива и, соответственно, высока вероятность сепарирования значительной части топлива в холодные периферийные зоны КС. С ростом режима работы, от малого газа до взлетного, когда давление подачи топлива растет, мелкость его распыливания увеличивается и вероятность его попадания во внешние зоны горения падает, выход БП значительно снижается. При этом интенсивность падения  $E_{БП}$  зависит от закона регулирования двигателя. В частности, для двигателей ТВД-1 и ТВАД-1, изменение режима работы которых не сопровождается изменением оборотов турбокомпрессора ( $n_{TK} = \text{const}$ ;  $P_k^*$ ,  $T_k^*$ ,  $G_b = \text{const}$ ), скорость снижения  $E_{БП}$  значительно меньше, чем для ТРДД-1 и ТРДД-2 ( $n_{TK} = \text{var}$ ), см. рис. 6. Это связано с тем, что у первой группы двигателей улучшение качества распыливания топлива связано только с повышением перепада давления на форсунках ( $\Delta P_f$ ), а у второй – увеличение режима приводит к улучшению мелкости распыливания за счет целой группы факторов – увеличение  $\Delta P_f$ ,  $P_k^*$  и скорости потока в воздушном завихрителе [15].

Из рассмотрения зависимостей, представленных на рис. 6, следует, что наибольший вклад в загрязнение окружающей среды канцерогенными ПАУ за время взлетно-посадочного цикла дает режим малого газа. Для значительного снижения выброса ПАУ на этом режиме необходимо, согласно рассмотренным выше представлениям, существенно улучшить качество распыливания топлива. Экспериментальная оценка эффективности такого мероприятия проводилась при испытаниях трубчатой КС авиационного ГТД на дизельном топливе. Для улучшения качества распыливания использовался принцип высоконапорного пневмораспыла: в первый контур форсунки подавалось топливо, а во второй – сжатый азот. Последнее обстоятельство позволяло устранить влияние на результаты испытаний обеднения смеси в первичной зоне, которое бы имело место при использовании для пневмораспыла сжатого воздуха. В результате проведенных испытаний камеры на режиме малого газа получено, что уменьшение среднего заутеровского диаметра с 80 до 17 мкм вызывает снижение выброса БП в 6 раз и НС в 3 раза.

При переводе авиационного ГТД на природный газ (без изменения конструкции КС), (см. рис. 7), выброс БП на малом газе снижается в 2...3 раза. С точки зрения развитых нами представлений результат может быть объяснен следующим образом. Во-первых, процессы пиролиза в газовом то-

пливе идут менее интенсивно, чем в жидких каплях, которые могут дополнительно прогреваться излучением от пламен, в то время как газ нагревается только в процессе смешения с продуктами сгорания. Во-вторых, отсутствие жидких капель существенно снижает вероятность попадания топлива в «бедные» области зоны горения. Отметим, что у ГТД, работающих на газе (ТВАД-2, ТВАД-3), есть большой резерв снижения выбросов БП и НС (при соответствующем росте полноты сгорания) за счет улучшения смешения газа с воздухом в первичной зоне КС.

Анализ закономерностей образования и выгорания БП (и других ПАУ) в условиях КС показывает, что основными путями снижения выброса БП являются: улучшение качества распыливания, интенсификация процессов смешения топлива с воздухом, обеднение первичной зоны, предварительная подготовка смеси и создание условий для уменьшения замораживания химических реакций вблизи стенки КС. Кардинальным способом, позволяющим вообще ликвидировать выброс БП, является сжигание предварительно подготовленной гомогенной ТВС с  $\alpha \sim 0,7$ .

Как видим, все перечисленные направления снижения величины  $E_{БП}$  полностью соответствуют направлениям современной концепции комплексного снижения выбросов нормируемых веществ CO, НС, NO<sub>x</sub> и дыма, и в той или иной степени реализуются в КС перспективных малотоксичных схем [15] (зонное горение, камеры с изменяемой геометрией, КС с предварительно подготовленной ТВС, каталитические камеры, КС с теплоизолированной стенкой и т.д.).

Это свидетельствует о том, что, во-первых, проблему снижения выброса канцерогенных веществ можно решать в рамках программы снижения выбросов нормируемых на сегодняшний день вредных веществ и, во-вторых, для КС перспективных схем можно ожидать пониженный уровень выброса БП (и других ПАУ).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате систематических исследований, проводимых в течение длительного времени в СГАУ и ЦИАМ по изучению рассматриваемой здесь проблемы, создан научно-технический задел, включающий в себя: методику отбора проб продуктов сгорания, позволяющую достоверно определять концентрацию БП (и других ПАУ) в отработавших газах; банк данных о выбросе БП с ОГ ряда авиационных ГТД, в том числе и для двигателей, работающих

на природном газе; закономерности образования и выгорания БП в модельных пламенах и развитие представления о протекании этих процессов в условиях КС; рекомендации по организации рабочего процесса в камере с пониженным выбросом БП.

В связи с актуальностью задачи снижения выброса канцерогенных веществ с ОГ авиационных ГТД дальнейшее развитие работы, на наш взгляд, целесообразно проводить по следующим основным направлениям:

углубление понимания физико-химических процессов изучаемого явления (изучение влияния на процесс образования БП давления в КС, двухфазности ТВС, химического состава топлива и аэродинамики первичной зоны), разработка моделей описывающих процесс образования и выгорания БП;

- разработка и апробирование методов снижения выброса БП (подготовка ТВС; пневматический распыл, гомогенизация, впрыск воды, эмульгирование; организация рабочего процесса в первичной зоне КС; снижение замораживания химических реакций в пристенной области);

- продолжение работы по созданию банка достоверных данных о выбросе БП современными авиационными ГТД;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1435991 СССР, МКИ G01N1/22. Способ отбора пробы продуктов сгорания и подготовки ее к анализу на бенз(а)пирен. / Кныш Ю.А., Горбатко А.А., Ивлиев А.В. и др. - № 4219355/31-26; Заяв. 01.04.87; Опубл. 07.11.88, Бюл. № 41. - 2с.
2. А.с. 1590954 СССР, МКИ G01N1/22. Устройство для отбора проб продуктов сгорания на бенз(а)пирен из выхлопных газов ГТД / Кныш Ю.А., Горбатко А.А., Ивлиев А.В. и др. - № 4219439/31-26; Заяв. 01.04.87; Опубл. 07.09.90, Бюл. № 33. - 2с.
3. А.с. 1511627 СССР, МКИ G01N1/22. Способ отбора пробы продуктов сгорания и подготовки ее к анализу на бенз(а)пирен. / Лукачев С.В., Ивлиев А.В., Матвеев С.Г. и др. - № 4344307/31-26; Заяв. 15.12.87; Опубл. 30.09.89, Бюл. № 36. - 2с.
4. Анализ погрешностей определения концентрации БП при использовании спектрально-флуоресцентного метода анализа. / Ивлиев А.В., Лукачев С.В., Розно В.Г., Урывский А.Ф. / Куйбышев. авиац. ин-т. - Куйбышев, 1989. -17с. -Деп. В ЦНТИ ГА 16.06.89. № 745-ГА.
5. Беджер Г.М. Химические основы канцерогенной активности. - М.: Медицина, 1966. - 124с.
5. Бурико Ю.Я., Кузнецов В.Р. Влияние химических реакций и процесса смешения на концентрации окиси углерода и углеводородов в турбулентном диффузионном факеле. // Физика горения и взрыва. - 1986. - Т.22. №4. - С.19...25.



7. ГОСТ 12.1.005-76. ССБТ Воздух рабочей зоны, общие санитарно-гигиенические требования – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 31с.
8. Защита окружающей среды при авиатранспортных процессах. / В.Г. Ененков, А.А. Горбатко, П.М. Желтов и др., Под ред. В.Г. Ененкова. – М.: Транспорт, 1984. – 198 с.
9. Ивлиев А.В., Розно В.Г. Применение спектрально-флуоресцентного метода количественного определения эмиссии бенз(а)пирена ГТД. // Горение в потоке. / Под ред. А.В. Талантова. – Казань, КАИ. – 1982. – С. 65...68.
10. Канило П.М., Подгорный А.Н., Христинич В.А. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 224с.
11. Канцерогенные вещества: Справочник. Материалы Международного агентства по изучению рака. / Пер. с англ. – М.: Медицина, 1987. – 336 с.
12. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
13. Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. – М.: Metallurgy, 1981. – 240с.
14. Лавров В.Н., Стасевич Н.Л., Каминна Г.М. О механизме образования бенз(а)пирена. // Доклады АН СССР. – 1972. – Т.206, №6. – С.1363...1366.
15. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 556с.
16. Лукачев С.В. Исследования закономерностей образования и выброса бенз(а)пирена при сжигании углеводородных топлив в камерах сгорания авиационных ГТД. // Изв. вузов. Авиационная техника. 1993. – №2. – С. 75...78.
17. Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Влияние подготовки топливовоздушной смеси на образование канцерогенных углеводородов при сжигании газообразных топлив. // Теплоэнергетика. – 1990. – №6. – С. 24...26.
18. Лукачев С.В., Матвеев С.Г. Некоторые вопросы образования бенз(а)пирена в турбулентном диффузионном факеле. // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т.26, №3. – С. 33...36.
19. Лукачев С.В., Матвеев С.Г. О влиянии качества распыливания топлива на выброс бенз(а)пирена с отработавшими газами авиационных ГТД. // Изв. Вузов. Авиационная техника. – 1992. – №3. – С. 74...76.
20. Лукачев С.В., Матвеев С.Г. О влиянии звука на турбулентный диффузионный факел пропана. // Изв. Вузов. Авиационная техника. – 1988. – №2. – С. 101...103.
21. Лукачев С.В., Матвеев С.Г., Анисимов М.Ю. Влияние неоднородности ТВС на интенсивность образования бенз(а)пирена при горении углеводородных топлив. // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1990. – №4. – С. 79...81.
22. Лукачев С.В., Матвеев С.Г., Орлов М.Ю. Выгорание канцерогенных углеводородов при диффузионном смешении продуктов неполного сгорания углеводородных топлив с воздухом. // Теплоэнергетика. – 1993. – №4. – С. 73...75.
23. Лукачев С.В., Матвеев С.Г., Урывский А.Ф. О возможности использования модели турбулентного смешения для описания процесса выгорания полициклических ароматических углеводородов. // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т.27, № 5. – С. 64...67.
24. Лукачев С.В., Матвеев С.Г., Урывский А.Ф., Анисимов М.Ю. Влияние начальной неоднородности топливовоздушной смеси на образование бенз(а)пирена в проточной камере сгорания. // Физика горения и взрыва. – 1991. – Т.27, № 2. – С. 76...79.
25. Лукачев С.В., Розно В.Г. О воспроизводимости результатов измерения концентрации БП в продуктах сгорания ГТД. / Кубыйшев. авиацион.-т. – Куйбышев. 1990. – 12с. Деп. В ЦНТИ ГА 07.05.90, № 805-ГА.



26. Матвеев С.Г., Лукачев С.В., Орлов М.Ю. Исследование влияния химического состава углеводородных топлив на образование бенз(а)пирена. // Химическая физика процессов горения и взрыва: Материалы XI симпозиума по горению и взрыву. Том 2. – Черногловка: ИХФ РАН, 1996. – С. 154...156.
27. Матвеев С.Г., Чечет И.В. Обоснование модели синтеза ПАУ на основе карбенного механизма пиролиза ацетилен. // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе. Том 2. – Самара: СГАУ, 1997. – С. 218...224.
28. Методические рекомендации по отбору и анализу проб продуктов сгорания авиационных ГТД на содержание бенз(а)пирена. / Кныш Ю.А., Лукачев С.В., Ивлиев А.В. и др. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1988. – 20 с.
29. Обеспечение достоверности проб отработавших газов для определения содержания в них бенз(а)пирена. / Кныш Ю.А., Горбатко А.А., Ивлиев А.В., Лукачев С.В., Розно В.Г. / Куйбышев. авиац. ин-т. – Куйбышев, 1986. – 19с. – Деп. В ЦНТИ ГА 17.05.89. – №741-ГА.
30. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив. / Бакиров Ф.Г., Захаров В.М., Полещук И.З. и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 128 с.
31. Об особенностях образования БП в камерах сгорания авиационных ГТД. / Кныш Ю.А., Горбатко А.А., Ивлиев А.В., Лукачев С.В., Розно В.Г. // Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24, №6. – С. 33...37.
32. О спектральном составе полициклических ароматических углеводородов в выхлопе ГТД. / Лукачев С.В., Розно В.Г., Смирнов Г.А., Хесина А.Я. // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1990. – №2. – С. 97...99.
33. Отбор проб отработавших газов для определения их канцерогенности. / Кныш Ю.А., Горбатко А.А., Ивлиев А.В., Лукачев С.В., Розно В.Г. // Изв. вузов. Авиационная техника, 1989. – №4. – С. 44...47.
34. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Защита окружающей среды. Т. II. Эмиссия авиационных двигателей. – Монреаль: Канада, 1981. – 123 с.
35. Теплицкая Т.А. Методы количественного анализа ПАУ для фонового мониторинга загрязняющих веществ. / В кн.: Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. Вып. 4. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – С. 257...263.
36. Химия горения: Пер. с англ. / Под ред. У. Гардинера .мл. – М.: Мир, 1988. – 464 с.
37. Шабад Л.М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. – М.: Медицина, 1973. – 367с.
38. Formation mechanisms of aromatic compounds in aliphatic flames. / Cole J.A., Bitner J.D., Longwell J.P., Howard J.B. // Combustion and Flame. – 1984. – V. 56, №1. – P. 51...70.
39. Frenclach M., Clary D.M., Gardiner W.C. Detailed kinetic modelling of soot formation in shoke-tube pyrolysis of acetylene. // 20<sup>th</sup> Symp. (Intern) on Combustion, 1984, Pittsburg, Combustion Institute – 1984. – P. 887...901.
40. Initial stages of soot formation in thermal pyrolysis of acetylene. / Merkulov A.A., Ovsyanikov F.F., Polak LS., Popov V.T. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 1989. – V.9, №1. – P. 95...119.