

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМ. С. П. КОРОЛЕВА

Ю. А. КНЫШ

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ВЫХЛОПА ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебное пособие

В пособии изложены основные закономерности образования в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей токсичных соединений: окиси углерода, дыма, несгоревших углеводородов и окислов азота. На основе анализа рабочего процесса показано влияние конструктивных и режимных параметров на эмиссионные характеристики двигателя. Кроме того, в книге дано краткое описание современных и перспективных методов снижения токсичности путем применения вихревых модулей, пневматического распыла топлива, каталитического горения и др.

Пособие предназначено для студентов специальностей 0537 и 1610, оно может быть полезно для инженеров, специализирующихся в области проектирования камер сгорания газотурбинных двигателей.

Темплан 1979 г., поз. 2139.

Рецензенты: кафедра «ВРД» Казанского авиационного института им. А. Н. Туполева

Утверждено редакционно-издательским советом 17.11.78 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди важнейших проблем современной науки и техники проблема охраны природной среды является наиболее актуальной. Реальная опасность возникновения необратимых изменений в атмосфере планеты вследствие глобального загрязнения ее продуктами сгорания энергетических установок и транспорта обусловила необходимость разработки ряда национальных и международных программ по ограничению выбросов в атмосферу токсичных соединений. В частности, международная организация гражданской авиации (ИКАО) опубликовала в 1977 году проект норм на эмиссии воздушно-реактивных двигателей, принятие и соблюдение которых безусловно уменьшит выбросы токсичных соединений в районах аэропортов.

Постоянное изучение путей уменьшения вредных выделений с отработанными газами стало неотложной задачей сегодняшнего дня. Особое внимание этому вопросу должно уделяться и в системе высшего образования при подготовке инженеров, в частности, будущих создателей новых образцов авиационных двигателей и силовых установок.

В настоящее время результаты исследований по уменьшению токсичности выхлопа в виде отдельных статей публикуются главным образом в периодических журналах, часть из которых не всегда доступна студентам. В то же время необходимость освещения вопросов рациональной эксплуатации и проектирования систем сжигания авиационных топлив при изучении курса «Основы теории воздушно-реактивных двигателей» стала очевидной.

В предлагаемом пособии автор стремился на основе современных представлений о рабочем процессе в камере сгорания изложить основные закономерности образования токсичных соединений и методов их уменьшения.

В первой главе дан краткий анализ процессов образования окислов азота, углеводов, окиси углерода и частиц твердого углерода. Основное внимание обращено на физическую сторону явления, особенности механизма окисления углеводородного топлива, кинетические и термогазодинамические факторы, обуславливающие появление токсичных соединений.

Во второй главе на примерах различных конструктивных схем камер сгорания с вихревыми модулями, каталитическими покрытиями, с регулируемой геометрией, форсунками воздушного распыления показана реальная возможность значительного уменьшения выбросов токсичных соединений в атмосферу с выхлопными газами авиационных двигателей, изложены современные и некоторые перспективные способы улучшения состава продуктов сгорания.

Материалом для написания пособия послужили статьи зарубежных ученых, опубликованные в период 1972—1978 гг., использованы также научные результаты исследования методов снижения токсичности ВРД, полученные автором совместно с сотрудниками лаборатории Куйбышевского авиационного института.

Автор выражает признательность за внимательный просмотр рукописи и полезные критические замечания зав. кафедрой «Теория двигателей летательных аппаратов» профессору, заслуженному деятелю науки и техники РСФСР д. т. н. *Лукачеву В. П.*, рецензентам: зав. кафедрой «ВРД» Казанского авиационного института заслуженному деятелю науки и техники РСФСР и Татарской АССР д. т. н., профессору *Талантову А. В.*, д. т. н. профессору *Дятлову И. Н.*, к. т. н. доценту *Щукину В. А.*, к. т. н. *Ярославцеву В. Г.*

Автор благодарит также сотрудников лаборатории и инженера *Смолину Р. Д.* за большую помощь в подготовке рукописи к изданию.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- v — скорость потока воздуха, м/с
 $Q_{\text{в}}$ — объемный расход воздуха, м³/с
 $Q_{\text{ж}}$ — объемный расход жидкости, м³/с
 $G_{\text{в}}$ — массовый расход воздуха, кг/с
 $G_{\text{т}}$ — массовый расход топлива, кг/с
 P_2 — давление воздуха на входе в камеру сгорания, Па
 $P_{\text{к}}$ — давление в камере сгорания, Па
 $\Delta P_{\text{ф}}$ — перепад давления на форсунке, Па
 T — температура газа, К
 R — универсальная газовая постоянная, 9,807 Дж/кг·К
 $\tau_{\text{л}}$ — время пребывания, с
 σ — коэффициент поверхностного натяжения, дин/см
 $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, г/см³
 $\mu_{\text{ж}}$ — вязкость жидкости, пз
 $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр капель, мкм
 α — коэффициент избытка воздуха,
 $\alpha = G_{\text{в}} / (G_{\text{т}} L_0)$,
 L_0 — стехиометрический состав смеси ($L_0 \approx 1,48$)
 Φ — эквивалентное отношение, $\Phi = 1/\alpha$
СО — окись углерода
НС — несгоревшие углеводороды

NO — окись азота

NO_2 — двуокись азота

NO_x — окислы азота

SN — число дымности

EI — индекс эмиссии, г/кг

ppm — единица измерения объемной концентрации газа.

ОБРАЗОВАНИЕ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ВРД

§ 1. ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ВРД

Рабочий процесс в камере сгорания условно можно подразделить на несколько основных этапов: подача и распределение воздуха по участкам камеры; распыление и испарение топлива; самовоспламенение смеси; стабилизация пламени. От степени совершенства организации каждого этапа зависят полнота сгорания топлива и уровень эмиссии токсичных соединений.

Рассмотрим основные принципы организации отдельных стадий рабочего процесса.

Подача и распределение воздуха

На рис. 1 показана типичная схема основной камеры сгорания [1]. Во входной части камеры расположен диффузор, в котором снижается скорость воздуха. Головной участок жаровой трубы — фронтное устройство — разделяет поступающий в камеру сгорания воздух на первичный (проходящий через фронтное устройство) и вторичный (протекающий в зазорах между кожухом и жаровой трубой и затем втекающий во внутрь жаровой трубы через систему отверстий в ее стенках). Фронтное устройство предназначено для организации процессов подготовки топливо-воздушной смеси и стабилизации факела пламени. Для этого на начальном участке жаровой трубы формируются определенные структу-

ры потока — зоны рециркуляции, в области которых средний состав смеси близок к стехиометрическому; количество поступающего через фронтное устройство воздуха обычно составляет около 20—30% от общего расхода. Эффективное выгорание смеси, начинающееся непосредственно за фронтным устройством, завершается в области втекания струй вторич-

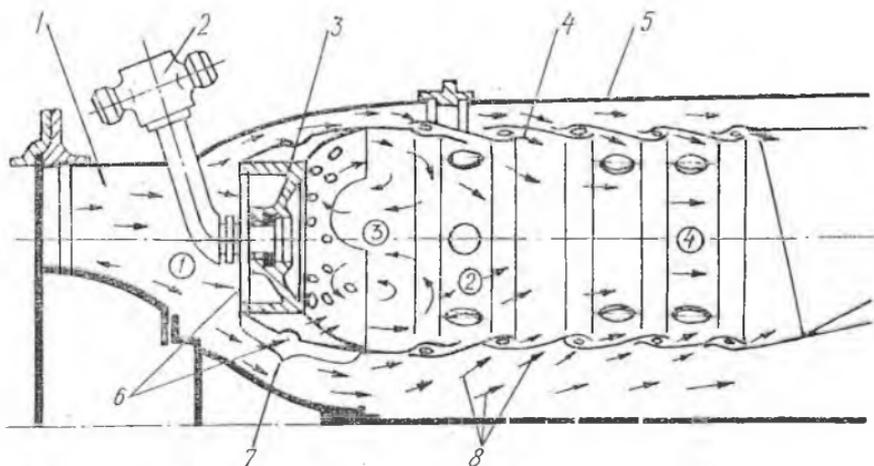


Рис. 1. Схема камеры сгорания ГТД: 1 — диффузор; 2 — форсунка; 3 — лопаточный завихритель; 4 — жаровая труба; 5 — наружный кожух; 6 — первичный воздух; 7 — фронтное устройство; 8 — вторичный воздух

ного воздуха через первые ряды крупных отверстий в жаровой трубе. Именно здесь происходит выгорание основной массы топлива. Последующие ряды более мелких отверстий предназначены для охлаждения стенок жаровой трубы и снижения среднemasовой температуры продуктов сгорания до допустимого уровня. Расположение отверстий и их размеры должны обеспечивать формирование необходимого поля температуры на выходе из камеры.

Исследованиями последних лет установлено, что традиционная схема организации рабочего процесса не удовлетворяет возрастающим требованиям по снижению выбросов токсичных соединений. Поэтому в настоящее время изыскиваются различные методы усовершенствования существующих конструкций камер и разрабатываются принципиально новые схемы организации горения.

На рис. 2 изображена перспективная схема камеры сгорания, в которой предусматривается сжигание предварительно испаренной и перемешанной бедной гомогенной топливо-воздушной смеси при точном регулировании температуры ее горения [2]. Такая камера содержит зону подготовки смеси, расположенную выше по потоку вокруг первичной зоны стабилизации пламени, а также зону смешения. Весь воздух, идущий в первичную зону, сначала перемешивается с распыленным топливом (зона подготовки смеси простирается до первичной зоны стабилизации пламени и обеспечивает время ее пребывания, достаточное для полного испарения капель топлива). Перемешанная смесь направляется через калиброванные отверстия, которые предотвращают проскок пламени из зоны стабилизации, физически ограниченной стенками первичной зоны камеры сгорания.

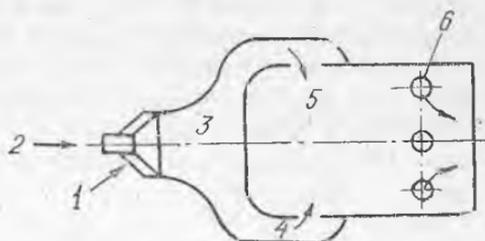


Рис. 2. Принципиальная схема камеры сгорания с предварительным испарением топлива: 1 — полный поток воздуха в первичную зону; 2 — подача топлива; 3 — зона предварительного перемешивания (подготовки смеси); 4 — топливо-воздушная смесь; 5 — первичная зона стабилизации горения; 6 — подача сместительного воздуха

Для перемешивания вторичного воздуха с продуктами сгорания служит зона смешения обычного типа. Эта камера названа «камерой с внешним испарением топлива» (КВИ).

Распыление топлива

Процесс распыления топлива сопровождается значительным увеличением площади поверхности на единицу массы подаваемого топлива. Например, площадь поверхности жидкой сферической капли диаметром 1 см увеличивается в тысячу раз, если ее распылить в монодисперсную струю, состоящую из одинаковых капель диаметром 10 мкм.

Вследствие распыления топлива скорость испарения может увеличиться по крайней мере на три порядка из-за увеличения поверхности теплоотдачи. Кроме того, уменьшение размера капель приводит к увеличению коэффициентов тепло- и массопереноса.

Применяется несколько типов распыляющих устройств (форсунок). В центробежных (механических) форсунках для создания высокоскоростной турбулентной струи топлива используется высокое давление подачи — до $(40—50) \cdot 10^5$ Па. Этот тип форсунок нашел широкое применение в камерах авиационных ГТД. Главным недостатком таких форсунок является грубый распыл, особенно при низких давлениях (средний диаметр капли превышает $50—100$ мкм), поэтому для систем предварительного испарения эти форсунки непригодны. Кроме того, при механическом распыле практически невозможно организовать предварительное перемешивание топлива с воздухом.

Пневматические форсунки имеют ряд преимуществ перед центробежными. Прежде всего, они способны давать более мелкие капли со средним диаметром $10—20$ мкм. Такая высокая степень распыления является следствием высоких напряжений сдвига между впрыскиваемой жидкостью и воздухом, который может подаваться во внутреннюю часть сопла форсунки (внутреннее смешение) или во внешнюю часть форсунки (внешнее смешение). Процесс распыления в них практически не зависит от ΔP_{ϕ} , т. е. размер капель, угол топливного факела, распределение капель по потоку остаются постоянными в широком диапазоне расходов топлива.

Широкое исследование средних размеров капель, полученных с помощью пневматических форсунок, проведено Никаямой и Таназавой. Ими получена формула, по которой с учетом плотности, вязкости и поверхностного натяжения может быть определен средний диаметр капли

$$d_{\text{ср}} = \frac{585 \sqrt{\sigma}}{v \sqrt{\rho_{\text{ж}}}} + 597 \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{V \sigma \rho_{\text{ж}}} \right)^{0,45} \left(1000 \frac{Q_{\text{ж}}}{Q_{\text{в}}} \right). \quad (1)$$

В случае, когда объемный расход воздуха значительно превышает расход топлива, начальный размер капель можно определить по упрощенной формуле

$$d_{\text{ср}} = 585 \frac{\sqrt{\sigma}}{v \sqrt{\rho_{\text{ж}}}}. \quad (2)$$

Особый класс пневматических форсунок представляют так называемые «акустические» форсунки, распыление топлива в которых осуществляется высокоскоростным пульсирующим с большой частотой потоком воздуха. По способу возбуждения колебаний в воздушном потоке акустические форсунки подразделяются на газоструйные и вихревые. Подробно с конст-

рукциями и характеристиками пневматических форсунок, построенных на основе газоструйного излучателя, можно ознакомиться в работе [3]. Мы ограничимся рассмотрением типовой конструктивной схемы акустической форсунки и некоторыми результатами ее испытаний.

На рис. 3 изображена акустическая форсунка со стержневым газоструйным излучателем Гартмана. Жидкость под небольшим давлением подается в цилиндрическую полость 4, расположенную снаружи излучателя, и затем вытекает через щелевой канал 3. Вытекающая из канала 3 пленка жидкости подвергается воздействию колебаний скорости и давления, генерируемых пульсирующим скачком уплотнения. Осциллирующий скачок уплотнения возникает вблизи воздушного сопла 2 при натекании сверхзвуковой струи на резонатор 1. В результате пленка дробится на мелкие капли, которые вместе с воздушной струей образуют факел распыла.

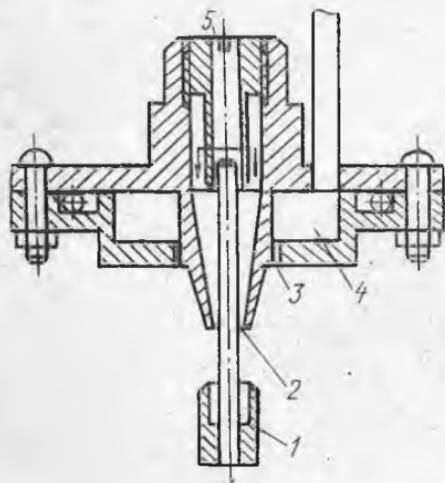


Рис. 3. Конструктивная схема акустической форсунки: 1 — резонатор; 2 — сопло для воздуха; 3 — щелевой канал; 4 — полость для жидкости; 5 — вход воздуха



Рис. 4. Кривые распределения капель по размерам: ● — при наличии пульсаций; ⊕ — без пульсаций, $\Delta P_{в} = 100$ кПа (1 атм); $G_{в} = 1,2$ г/с; $\Delta P_{ж} = 20$ кПа (0,2 атм); $G_{ж} = 1,86$ г/с

Следует отметить, что механизм распыления жидкости при воздействии пульсаций газообразной струи изучен недостаточно. Однако известно, что пульсации в потоке воздуха оказывают значительное влияние на процесс распыления. Как видно из рис. 4, при наличии пульсаций диаметр капель уменьшается примерно в 2 раза (с 60 до 27 мкм).

В газоструйных генераторах необходимо создавать сверхкритический перепад давления на воздушном сопле. В авиационных ГТД такие условия работы (при отсутствии постороннего источника сжатого воздуха) могут быть реализованы только в форсажном контуре. Это обстоятельство явилось основной причиной, сдерживающей применение газоструйных акустических форсунок в основных камерах ГТД.

Указанных недостатков лишена вихревая акустическая форсунка [4, 5], которая применяется для распыления топлива в камерах авиационных ГТД. Построенная на основе вихревого генератора звука [6], эта форсунка способна генерировать интенсивные звуковые колебания и распылять топливо при сравнительно малых перепадах давления.

Схема вихревой акустической форсунки показана на рис. 5.

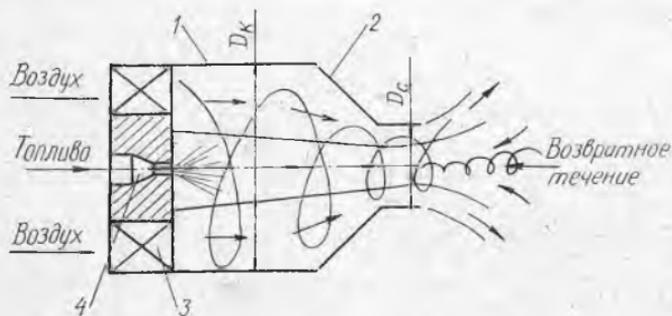


Рис. 5. Схема вихревой акустической форсунки: 1 — вихревая камера; 2 — сопло; 3 — лопаточный завихритель; 4 — распылитель топлива

Поток воздуха, проходя через завихритель, приобретает в вихревой камере вращательное движение, интенсивность которого зависит от угла наклона лопаток завихрителя и степени поджатия сопла D_k/D_c . Благодаря закрутке воздуха в центре форсунки образуется область возвратного течения. Взаимодействие прямого и возвратного течений носит явно выраженный автоколебательный характер и приводит к возбуждению в вихревом потоке воздуха интенсивных пульсаций скорости и давления [6]. При этом частота пульсаций пропорциональна объемному расходу воздуха (рис. 6) и может достигать 10 кГц и более, а интенсивность колебаний вблизи сопла форсунки может составлять 140—145 Дб при скоростях потока, характерных для камер ГТД (рис. 7). Топливо впрыскивается обычным центробежным распылителем в об-

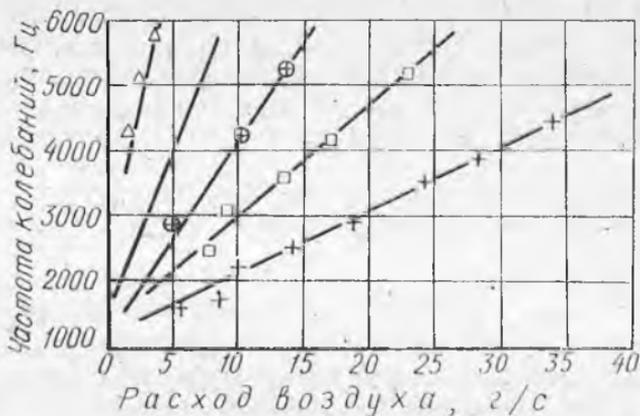


Рис. 6. Зависимость частоты дискретного тона от расхода воздуха через форсунку для разных степеней поджатия сопла ($C = D_c / D_{кв}$) при $\varphi = 45^\circ$: Δ — $C = 2,14$; --- $C = 2$; \oplus — $C = 1,7$; \square — $C = 1,52$; + — $C = 1$

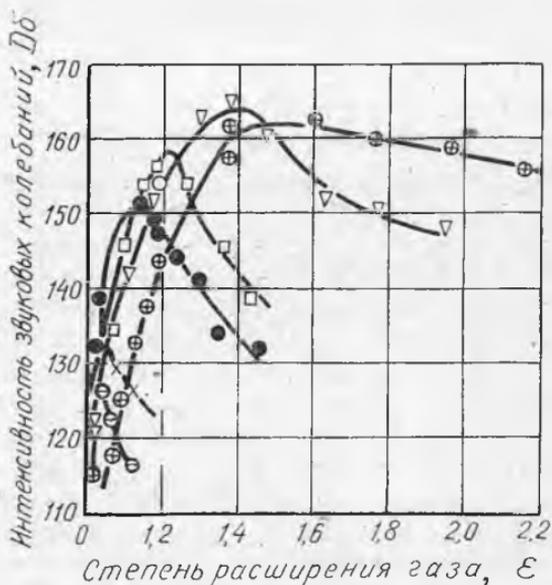


Рис. 7. Зависимость уровня звукового давления от степени расширения газа в форсунке при разных поджатиях сопла при $\varphi = 45^\circ$: \oplus — $C = 1$; ∇ — $C = 1,3$; \square — $C = 1,5$; \bullet — $C = 1,7$; \ominus — $C = 2,4$

ласть максимальных сдвиговых напряжений между прямым и возвратным течением. Пульсации скорости оказывают интенсифицирующее воздействие на процесс дробления капель, диаметр которых достигает 20—40 мкм при скорости воздуха перед форсункой 120—130 м/с.

Испарение топлива

Испарение распыленного топлива является второй важной ступенью подготовки смеси. Количество паров топлива в потоке горячего воздуха в конечном счете лимитируется фазовым равновесием смеси. После того как концентрация паров достигнет насыщения, топливо испаряться не будет, независимо от времени протекания процесса.

По закону Дальтона отношение массы паров топлива к массе воздуха выражается уравнением

$$\frac{G_{II}}{G_B} = \frac{M_{II} P_{II}}{29 (P_{см} - P_{II})}, \quad (3)$$

где $\frac{G_{II}}{G_B}$ — отношение массы пара к массе воздуха;

M_{II} — молекулярный вес паров топлива при данной температуре;

$P_{см}$ — полное давление в смеси.

Для однокомпонентного топлива равновесное отношение массы пара к массе воздуха в зависимости от температуры можно рассчитать по уравнению (3). Для таких топлив, как бензин, который является смесью различных химических веществ, равновесное состояние паровоздушной смеси должно определяться экспериментально. Однако анализ равновесного состояния не дает сведений о скорости испарения топлива.

Испарение представляет собой кинетический процесс, при котором молекулы покидают поверхность жидкой капли и диффундируют в окружающий воздух. Процесс этот определяется тепловым состоянием системы. При низких температурах воздуха основным является процесс диффузии, при высоких — скорость передачи тепла от воздуха к жидкости.

Диаметр одиночной сферической капли, испаряющейся в воздухе, в функции времени можно рассчитать по закону квадрата диаметра [2]:

$$d^2 = d_0^2 - \lambda t, \quad (4)$$

где λ — коэффициент испарения, см²/с;

d_0, d — начальный и текущий диаметр капли;
 t — время, с.

Зависимость коэффициента испарения капли в неподвижном воздухе от температуры определяется выражением

$$\lambda_0 = (8k/\rho_{\text{ж}} C_p) \ln(1 + B), \quad (5)$$

где λ_0 — коэффициент испарения в неподвижном воздухе;

k — теплопроводность воздуха;

C_p — удельная теплоемкость;

$B = C_p (T_{\text{в}} - T_{\text{ж}})/L$ — коэффициент теплоотдачи при испарении;

$T_{\text{в}}, T_{\text{ж}}$ — температура воздуха и жидкости;

L — скрытая теплота испарения.

При наличии относительного движения воздуха и капли применяется следующее выражение, учитывающее влияние вынужденной конвекции:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + 0,276 Re^{1/2} Sc^{1/3}), \quad (6)$$

где λ — коэффициент испарения при вынужденной конвекции;

Re — число Рейнольдса;

Sc — критерий Шмидта.

В этой формуле число Re для капли рассчитывается по относительной скорости капли и воздуха.

Полное время испарения капли является важным параметром для расчета зоны подготовки смеси. Установлено, что для капли и воздуха, движущихся в зоне подготовки камеры, не обязательна одинаковая скорость. Вынужденная конвекция уменьшает общее время испарения, требуемое для капли данного диаметра. При оценке испарения с запасом времени в зоне подготовки в расчет можно принимать коэффициент испарения в неподвижном воздухе (в предположении, что капля и воздух движутся с одинаковой скоростью).

Самовоспламенение

При предварительном перемешивании топливо-воздушной смеси в условиях высоких температур возникает проблема предотвращения самопроизвольного воспламенения смеси до ввода ее в первичную зону камеры. Самовоспламенение в зоне подготовки камеры внешнего испарения (КВИ) недопустимо, поскольку пламя будет стабилизироваться около

форсунки, вызывая перегрев и разрушение этой зоны. Горение капле приведет также к повышению уровня образования окислов азота.

Поэтому конструировать камеру следует с учетом того, что время пребывания топливо-воздушной смеси и ее температура должны иметь значения, исключающие самовоспламенение.

Принято считать, что полное время задержки воспламенения топливо-воздушной смеси подразделяется на время физической задержки воспламенения — от момента попадания капли топлива в поток воздуха до момента образования горючей топливо-воздушной смеси и ее нагревания до температуры самовоспламенения — которое главным образом определяется процессами испарения топлива и теплообмена, и время химической задержки воспламенения, определяющееся как время от начала заметной химической реакции до момента самовоспламенения. Время физической задержки воспламенения в общем сравнимо со временем химической задержки, которое для углеводородо-воздушных смесей можно выразить уравнением

$$\tau = \frac{(CН)_n^{1/x}}{O_2} K \exp (E/RT). \quad (7)$$

Это уравнение показывает, что время химической задержки является экспоненциальной функцией изменения температуры смеси. Такая зависимость основывается на законе Аррениуса, описывающего влияние температуры на скорость реакции. В адиабатической системе тепло, выделяемое в предпламенной реакции окисления, увеличивает температуру системы, что в свою очередь приводит к увеличению скорости окисления. Этот процесс продолжается до возникновения горения. Уравнение (7) показывает также, что время химической задержки зависит от исходных концентраций горючего и окислителя.

Время задержки, измеренное для изооктана C_8H_{18} , изододекана $C_{12}H_{26}$ и керосина, показано на рис. 8. Из рисунка видно, что значительное уменьшение времени задержки воспламенения наблюдается при увеличении начальной температуры. Увеличение давления, влияние которого на рисунке не показано, приводит к уменьшению времени задержки. Установлено, что время задержки воспламенения для керосина незначительно зависит от состава смеси в диапазоне величин α от 5 до 13 и от размера капле в диапазоне 1—140 мкм.

Известно, что время задержки воспламенения зависит от экспериментального оборудования и условий проведения опытов. При оценочных расчетах зоны подготовки смеси можно пользоваться данными, приведенными на рис. 8. Начальные размеры капель топлива, распыляемых форсункой в зоне подготовки, должны быть такими, чтобы время их испарения было меньше времени задержки воспламенения. Т. е. зона перемешивания должна быть сконструирована таким образом, чтобы время пребывания смеси в ней превышало время испарения, но было бы меньше времени задержки воспламенения.

Расчет зоны подготовки смеси по среднему времени пребывания, которое меньше времени задержки воспламенения, не гарантирует отсутствия воспламенения.

Торможение потока топливо-воздушной смеси у поверхностей более горячих, чем газ, может вызвать самовоспламенение из-за увеличения локальной температуры газа или локального времени пребывания. Если газ в пограничном слое у стенки нагревается вследствие теплоотдачи до температуры выше средней массовой, то время задержки (см. рис. 8) воспламенения, определяемое по повышенной температуре пограничного слоя, уменьшается. Увеличение времени пребывания в пограничном слое также может привести к самовоспламенению.

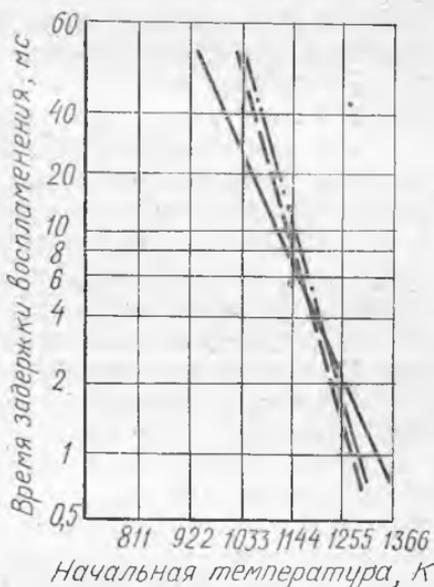


Рис. 8. Зависимость времени задержки воспламенения от начальной температуры: — — — керосин; — · — · — изододекан C₁₂H₂₆; — — — изооктан C₈H₁₈

Стабилизация пламени

Процессы стабилизации пламени в первичной зоне имеют важное значение с точки зрения достижения высокой полноты сгорания топлива, необходимой для низкого уровня выбросов вредных примесей.

Рассмотрим наиболее общие проблемы, связанные со стабилизацией высокотемпературного пламени в топливо-воздушной смеси. При типичном режиме работы ГТД скорость воздуха на входе в камеру составляет 60—120 м/с, что по крайней мере на порядок выше скорости распространения турбулентного фронта пламени. Для стабилизации пламени в таких условиях необходимо выполнение двух требований:

— по составу топливо-воздушная смесь должна находиться в пределах устойчивого горения;

— для поддержания горения нужно организовать циркуляционное течение, необходимое для смешения горячих продуктов сгорания, содержащих химически активные компоненты, с поступающими реагентами.

Процесс горения должен быть стабильным в приемлемом диапазоне составов смеси и температур и обеспечивать высокую полноту сгорания. Стабилизация пламени в гомогенной смеси связана с дополнительными трудностями из-за отсутствия богатых областей или капель, которые могут улучшить стабилизацию.

Схемы устройств для стабилизации пламени можно разделить на две основные группы: физические стабилизаторы пламени и чисто аэродинамические устройства. Физическими стабилизаторами пламени являются плохообтекаемые тела, уступы на стенках и стабилизаторы с возвратным течением. Аэродинамические стабилизаторы представляют собой встречные соударяющиеся или закрученные струи воздуха [1]. Существенные особенности этих схем показаны на рис. 9. Используются также комбинации перечисленных устройств.

Каждая схема стабилизации пламени имеет две характерные зоны течения: циркуляционную и зону распространения пламени. В циркуляционной зоне содержатся частично или полностью прореагировавшие вещества, имеющие высокую температуру. Свежие горючие компоненты поджигаются вблизи верхнего по потоку конца циркуляционной зоны горячими циркулирующими продуктами сгорания, содержащими химически активные вещества. Вблизи циркуляционной зоны поджигается только небольшая часть топливо-воздушной смеси. В остальном объеме происходит распространение фронта пламени от точки поджигания вниз по потоку. Для получения высокой полноты сгорания вещества необходимо быстрое распространение пламени по всему сечению потока и завершение горения до зоны смешения, в которой происходит охлаждение газов. Следовательно, стабилизация пламени

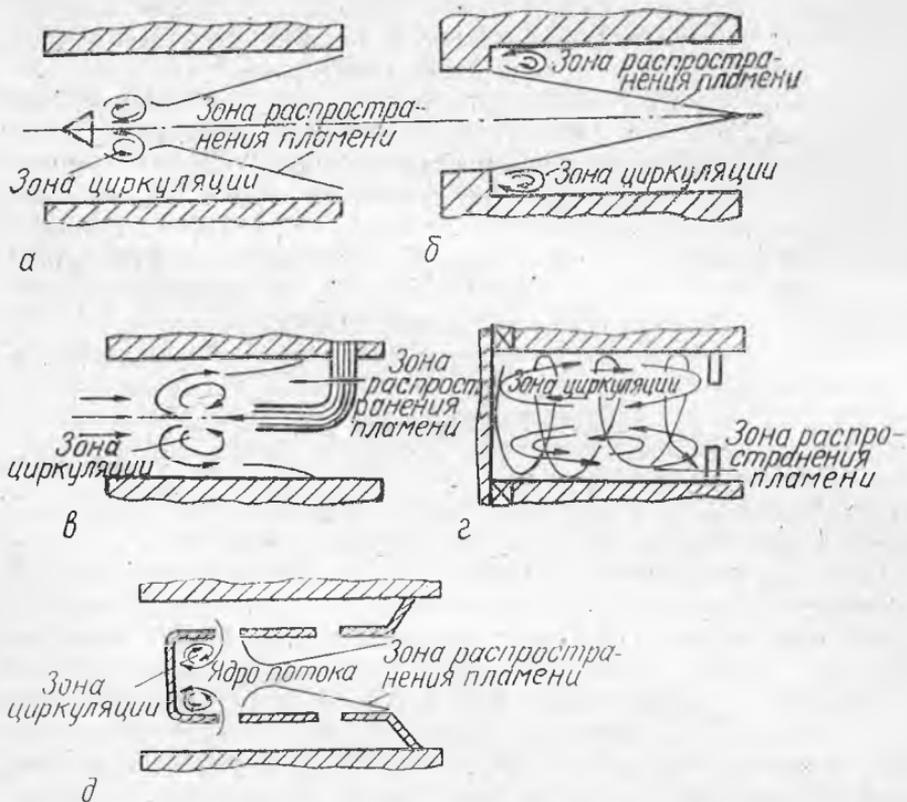


Рис. 9. Схемы устройств для стабилизации горения: а — плохо обтекаемое тело; б — стенка с уступами; в — встречная струя; г — завихритель воздуха; д — соударение струй

определяется характеристиками зоны циркуляции, в то время как на полноту сгорания влияет скорость распространения фронта пламени от циркуляционной зоны к остальному потоку.

Выбор схемы стабилизации производится на основе заданного диапазона устойчивой работы по составу смеси, по полноте сгорания и потерям давления в камере.

Рассмотрим схемы физической стабилизации пламени. Наиболее изучена стабилизация с использованием плохообтекаемого тела (рис. 9а). Стабилизатор представляет собой конус, уголок или цилиндр, помещенные в поток с целью обеспечения условий образования вихревого циркуляционно-

го течения в следе. Диапазон стабилизации пламени зависит от степени загромождения потока и расширяется при увеличении загромождения потока стабилизаторами.

Для отдельного стабилизатора угол, под которым пламя распространяется по потоку, определяется скоростью распространения пламени и скоростью потока. Этот угол может быть очень мал при скоростях, типичных для ГТД, поэтому для получения высокой полноты сгорания требуется длинная камера. Уменьшить объем зоны горения можно путем установки в камере системы стабилизаторов. Однако это приводит к увеличению потерь давления в камере.

Стабилизатор с уступами на стенках (рис. 9б) во многом подобен плохообтекаемому телу, поскольку обе схемы основаны на разделении потока и отрыве его от кромки для создания циркуляционного течения в следе. Степень циркуляции определяется глубиной уступа. Здесь так же, как и в случае плохообтекаемого тела, требуется весьма длинный канал для распространения пламени до его осевой линии.

Для высокотемпературных камер ГТД, где требуется при небольших объемах обеспечить высокую полноту сгорания, предпочтительна аэродинамическая стабилизация пламени. Схема стабилизации на встречных струях (рис. 9в) построена по принципу торможения основного потока высокоскоростной встречной струей и образования за ней циркуляционного течения [7]. Эта схема имеет ряд существенных преимуществ, особенно при использовании в форсажных камерах сгорания: низкое гидравлическое сопротивление камеры на бесфорсажном режиме, простота регулирования состава смеси.

Закручивание потока воздуха является, пожалуй, наиболее распространенным способом стабилизации пламени в камерах авиационных ГТД. В таком устройстве (рис. 9г) поток имеет тангенциальную составляющую скорости, благодаря чему в первичной зоне создается область пониженного давления. Под влиянием положительного осевого градиента давления в эту область устремляются высокотемпературные продукты сгорания из вторичной зоны, и таким образом формируется центральная зона циркуляции. Ее протяженность зависит от интенсивности крутки потока, определяемой как отношение количеств движения в тангенциальном и осевом направлениях. Завихрители способны обеспечить хорошую стабилизацию пламени в очень бедных смесях ($\alpha > 40-50$) при удовлетворительной полноте сгорания,

Стабилизация с помощью соударяющихся струй показана на рис. 9д.

Воздушные струи, вдуваемые перпендикулярно оси потока, сталкиваются у центральной линии. При этом часть потока течет в обратном направлении, и при повороте у передней стенки камеры возникает зона циркуляции. Остальная часть потока движется в прямом направлении и образует центральное ядро течения. Стабилизация горения определяется циркуляционным течением. Данная схема характеризуется хорошей стабилизацией пламени, высокой полнотой сгорания и, по мнению авторов работы [2], лучше всего подходит для небольших камер с предварительным испарением топлива.

§ 2. ОСНОВНЫЕ ТОКСИЧНЫЕ ВЕЩЕСТВА. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Основными продуктами загрязнения, содержащимися в выхлопе реактивных двигателей, являются окислы азота NO_x , окись углерода CO , несгоревшие углеводороды HC и частицы (дым). Кроме них в выхлопе содержатся и другие загрязнители атмосферы: окислы серы, альдегиды, аэрозоли, одоранты [8], а также ароматические полициклические углеводороды, например, безн(а)пирен [9]. Если рассматривать количество образовавшихся вредных продуктов в виде массовой доли от сгоревшего топлива, то для большинства режимов работы двигателя выход этих продуктов обычно составляет 0,1—1%.

Концентрация выбросов в значительной степени зависит от режима работы двигателя. Камеры сгорания рассчитываются на получение максимальных КПД на взлете и крейсерском режиме. При дросселировании двигателя полнота сгорания уменьшается и, как следствие этого, увеличивается количество выбросов загрязняющих веществ. Так, на режиме малого газа полнота сгорания составляет 88—96% и зависит от размеров двигателя, его мощности, ресурса, количества перепускаемого из компрессора воздуха и др.

Главными выбросами на малом газе являются окись углерода (до 50—60 г/кг топл.) и углеводороды (до 10—20 г/кг топл.) как в виде исходного топлива (физический недожег), так и в виде частично окисленных компонентов топлива (химический недожег). Последние вещества и обуславливают

характерный запах, присущий всем аэропортам, принимающим реактивные самолеты. Невысокая полнота сгорания объясняется низкими значениями температуры (360—450 К) и давления (около $2-4 \cdot 10^5$ Па на входе в камеру. Кроме того, при бедных составах смеси на режиме малого газа топливные форсунки работают на малых перепадах давления $(2-4) \cdot 10^5$ Па, что приводит к значительному ухудшению дисперсности распыления и неравномерному распределению топлива в зоне горения.

Еще более усугубляет проблему плохая летучесть авиационного топлива.

По мере увеличения мощности двигателя давление и температура на входе в камеру сгорания возрастают. На режимах полной мощности полнота сгорания приближается к 100%, а содержание СО и HC в выхлопных газах пренебрежимо мало. Однако высокие температуры и давления в камере приводят к образованию окислов азота и дыма. На взлете выбросы NO_x достигают 40—50 г/кг топлива и дыма — до 10—15 единиц (SAE) [10].

В качестве иллюстрации на рис. 10 показано изменение содержания токсичных компонентов в зависимости от нагрузки двигателей I ТЗД, I Т8Д и I Т9Д [11].

Окислы серы образуются при окислении серы, содержащейся в топливе. Уровни выброса непосредственно связаны с содержанием серы в топливе и не зависят в заметной степени от типа двигателя. Посколь-

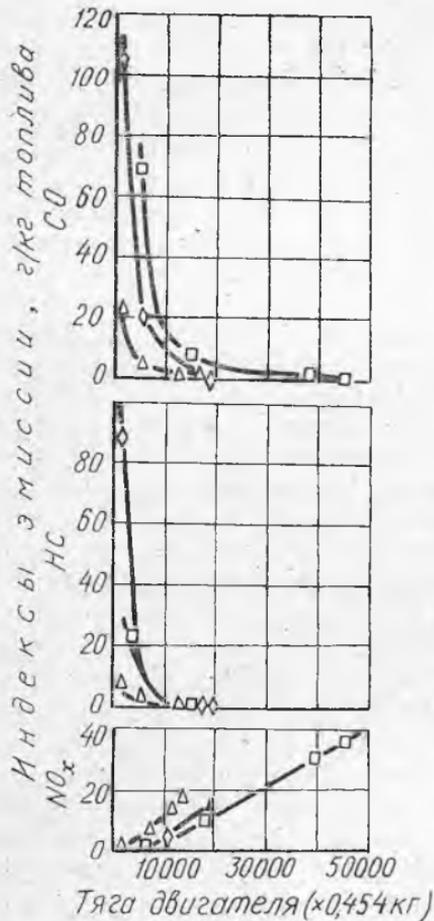


Рис. 10. Изменение содержания токсичных компонентов в выхлопных газах двигателей в зависимости от нагрузки: □ — I Т9Д; △ — I Т8Д; ◇ — I ТЗД

ку в реактивном двигателе удаление окислов из выхлопных газов затруднено, регулирование выброса осуществляется уменьшением содержания серы в топливе.

Выброс альдегидов из ГТД, по-видимому, соизмерим с выбросом их из поршневых двигателей: в обоих случаях показатель выброса составляет 1 г/кг топлива [8]. Сравнительно высокая концентрация альдегидов относительно низкого выброса несгоревших углеводородов связана с горением бедной топливной смеси. Уровень выброса зависит от устройства камеры сгорания, особенно от изменения во времени температуры продуктов сгорания.

Аэрозольные выбросы из газовых турбин достаточно высоки. Показатель аэрозольного выброса для турбореактивных двигателей составляет 9 г/кг, тогда как для поршневых авиационных двигателей он равен 2 г/кг. Аэрозоли включают в себя агломераты и конденсаты малого размера и могут служить адсорбентами для активных выбросов. Роль аэрозолей в загрязнении атмосферы, если не считать ухудшения видимости, не установлена.

По результатам систематического исследования характеристик запаха выхлопа реактивных двигателей публикаций не имеется.

Механизм образования полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в процессе горения авиационных топлив ясен только в общих чертах, в настоящее время нет ни одной публикации о систематических измерениях ПАУ в выхлопных газах ГТД. Тем не менее, сложилось мнение, что авиация является одним из возможных источников широкого распространения канцерогенов в атмосфере [9, 12]. Работы по исследованию закономерностей образования бенз(а)пирена в выхлопных газах авиадвигателей начаты в Куйбышевском авиационном институте [13].

Измерение концентраций токсичных компонентов в настоящее время регламентируется циркуляром ИКАО (Международная организация гражданской авиации), изданным в 1977 г. [14]. В этом документе содержатся методики проведения измерений, обработки полученных результатов, рекомендуются приборы. В частности, дым измеряется в так называемых «числах дымности» (SN) путем фильтрации продуктов сгорания через контрольный белый фильтр. По степени затемнения поверхности фильтра осажденными частицами оценивается уровень задымленности.

Газообразные продукты измеряются в «частях на миллион (ppm)», т. е. в единицах объемной концентрации газа на миллионную часть объема газовой смеси, в состав которой входит этот газ. Концентрацию углеводородов (НС) рекомендуется определять с помощью пламеионизационного детектора, СО и СО₂ — с помощью нерассеивающих инфракрасных анализаторов, NO_x — по методу хемилюминесценции [14].

Более удобной единицей измерения этой величины является «интенсивность эмиссии» — в граммах токсичного вещества, выделяемого в секунду, или в «индексах эмиссии (EI)» — в граммах вещества, отнесенных к килограмму сгоревшего топлива.

Для общей оценки эмиссии загрязняющих веществ авиадвигателями в течение взлетно-посадочного цикла Агентством по охране окружающей среды США (ЕРА) введен параметр ЕРАРi, выражаемый массой выделившегося за цикл

вещества, отнесенной к тяге в 1000 кгс $\left[\frac{\text{кг}/1000 \text{ кгс} \cdot \text{ч}}{\text{цикл}} \right]$:

$$EPA Ri = \frac{\sum_{ij} (\tau_{ij}/60) G \tau_j E I_{ij}}{\sum_j (\tau_j/60) R_j},$$

где τ — время работы двигателя, мин;

R — тяга, кгс;

i — вид токсичного вещества (СО, НС, NO_x);

j — режим работы двигателя (малый газ, снижение, набор высоты, взлет на уровне моря).

Стандартами США предусмотрена следующая продолжительность режимов взлетно-посадочного цикла (в минутах): малый газ — 26; взлет — 0,7; набор высоты — 2,2; снижение — 4,0.

По результатам испытаний обычных (однозонных) камер сгорания могут быть определены эмиссионные характеристики двигателя по следующим приближенным формулам:

$$(E I_{NO_x})_{дв} = (E I_{NO_x})_{кам} \left(\frac{P_{2 дв}}{P_{2 кам}} \right)^{0,5} \frac{T_{3 дв}}{T_{3 кам}} \cdot \frac{v_{дв}}{v_{кам}} \exp 0,0188 \times \\ \times (H_{кам} - H_{дв}) \exp \left(\frac{T_{2 дв} - T_{2 кам}}{288} \right),$$

где P_2 и T_2 — полные давления и температура на входе в камеру сгорания;

v — характерная скорость в камере сгорания;

H — удельная влажность воздуха на входе в камеру,

г/воды/кг воздуха (на уровне моря стандартная влажность $H = 6,29$);

T_3 — температура перед турбиной

(индексами «кам» и «дв» обозначены величины, измеряемые при испытаниях камеры сгорания и двигателя соответственно),

$$(EI_{CO})_{дв} = (EI_{CO})_{кам} \frac{P_{2\text{ кам}}}{P_{2\text{ дв}}};$$

$$(EI_{HC})_{дв} = (EI_{HC})_{кам} \frac{P_{2\text{ кам}}}{P_{2\text{ дв}}}.$$

В качестве примера в табл. 1 представлены эмиссионные характеристики двигателя ИТ8Д-17 и нормы ЕРА [15].

Таблица 1

Сравнение эмиссионных характеристик двигателя ИТ8Д-17 (исходный уровень) с нормами ЕРА

Режим работы	Эмиссия						Число «дымности»	
	СО		НС		NO _x		норма ЕРА	исходный уровень
	норма ЕРА	исходный уровень	норма ЕРА	исходный уровень	норма ЕРА	исходный уровень		
Индексы эмиссии, г/кг								
Малый газ	12,2	44,5	2,1	12,8	3,2	3,7		
Снижение (30% тяги)	1,1	7,5	0,4	0,67	4,2	8,5		
Набор высоты (85% тяги)	0,2	0,89	0,13	0,04	5,1	20,0		
Взлет (100%)	0,16	0,55	0,11	0,03	5,2	24,4		
Параметры ЕРА, $\frac{\text{кг}}{1000 \text{ кгс} \cdot \text{ч}}$ цикл								
Все четыре режима	4,3	11,1	0,8	4,4	3,0	8,2	25	25—30

Окислы азота NO_x образуются при всех процессах сгорания с использованием воздуха в качестве окислителя.

Образование NO происходит вследствие контакта атмосферного кислорода и азота при высокой температуре пламени.

Механизм образования NO из азота и кислорода определяется цепной реакцией, впервые рассмотренной Зельдовичем [16] для реагирующей системы $\text{H}_2\text{—O}_2\text{—N}_2$. Скорость образования (и распада NO) в значительной степени зависит от температуры и рассчитывается обычно по уравнениям реакций:



Скорость образования NO можно определить и по уравнению

$$\frac{d(\text{NO})}{dt} = K_1 f (\text{O}) (\text{N}_2) - K_1 b (\text{NO}) (\text{N}) + K_2 f (\text{N}) (\text{O}_2) + K_2 b (\text{NO}) (\text{O}), \quad (10)$$

где константы скоростей реакции, измеряемые в $\text{см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$, равны [3]:

$$K_{1f} = 6,19 \cdot 10^{13} \cdot T^{0,1} \exp(-75241/RT);$$

$$K_{1b} = 3,10 \cdot 10^{13} T \exp(-334/RT);$$

$$K_{2f} = 6,43 \cdot 10^9 T \exp(-6250/RT);$$

$$K_{2b} = 3,66 \cdot 10^8 T^{1,16} \exp(-37,847/RT).$$

Здесь T — температура реакции в градусах Кельвина.

Вследствие экспоненциальной зависимости констант скоростей реакций от температуры скорость образования NO по уравнению (8) будет изменяться экспоненциально с изменением температуры. На рис. 11 показаны рассчитанные по уравнению (10) значения концентрации NO в функции времени для нескольких температур пламени (или составов смеси) при начальной температуре 811 К. Из рисунка видно, что по мере уменьшения температуры пламени путем увеличения α время, требуемое для достижения данной концентра-

ции NO, увеличивается, т. е. за то же время количество образовавшейся NO уменьшается. Время пребывания смеси в первичной зоне камеры сгорания составляет около 5 мс. По этому времени и данным рис. 11 можно оценить кинетический предел концентрации NO, в основном для первичной зоны камеры. Следует отметить, что для однородной смеси за 5 мс образуется ничтожно малое количество NO, если температура пламени меньше 1922 K, т. е. низкие концентрации NO можно обеспечить при горении бедной гомогенной смеси с равномерной низкой температурой пламени.

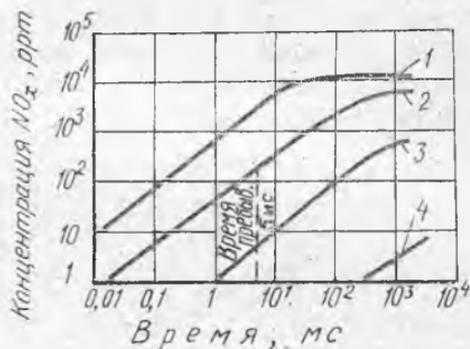


Рис. 11. Зависимость концентрации образовавшейся NO_x от времени при различных температурах пламени и составах смеси ($T_{\text{нач}} = 811 \text{ K}$): $T_{\text{к}}$ равно соответственно 1 — 2470 K ($\alpha = 1,36$); 2 — 2200 K ($\alpha = 1,63$); 3 — 1922 K ($\alpha = 2$); 4 — 1644 K ($\alpha = 2,7$).

Послепламенная концентрация азота и кислорода непосредственно зависит также от α . Следовательно, равновесная концентрация NO является функцией $T_{\text{нач}}$ и α . Рассчитать равновесную концентрацию NO можно по формуле [2]:

$$(\text{NO})_{\text{равн}} = \sqrt{K (\text{O}_2) (\text{N}_2)}, \quad (11)$$

где $\text{NO}_{\text{равн}}$ — равновесная концентрация окиси азота (молярная доля);

$K = A \exp(-E/RT)$ — константа скорости равновесной реакции; A — коэффициент; (O_2) — послепламенная концентрация кислорода (молярная доля); (N_2) — послепламенная концентрация азота (молярная доля).

«Бедная» ветвь кривой равновесной концентрации NO с соответствующей температурой пламени, рассчитанная по формуле (11), показана на рис. 12. С увеличением начальной температуры при данном значении α концентрация NO экспоненциально возрастает. Однако при заданной начальной температуре бедным составам смеси соответствуют более низкие равновесные концентрации NO. Например, равновесная кон-

центрация NO при $\alpha \cong 1,36$ и начальной температуре 311 К такая же, как и при $\alpha = 2,04$ и начальной температуре 811 К. Обусловлено это тем, что при указанных условиях температура пламени одинакова, хотя для более бедных смесей концентрация кислорода выше. Из рис. 12 видно, что низкая концентрация NO возможна и при высоких начальных температурах, если камера работает на бедной, предварительно перемешанной смеси воздуха и топлива, которая обеспечивает низкую температуру пламени.

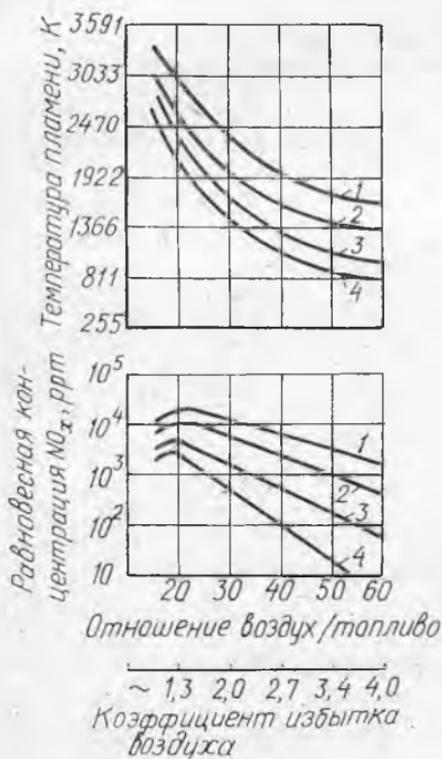


Рис. 12. Зависимость температуры пламени и равновесной концентрации NO от состава смеси при различных начальных температурах: $T_{\text{нач}}$ равно соответственно 1—1089; 2—811; 3—533; 4—311 К

Другим путем достижения низкой концентрации NO является организация горения при составе смеси богаче стехиометрического.

На «богатой» ветви кривой равновесной концентрации NO наблюдается еще более значительное уменьшение концентрации NO по мере обогащения смеси (рис. 13). На рисунке показано изменение равновесной концентрации NO_x от α и T при сжигании топлива *IetA* [17]. Пунктиром нанесена кинетическая кривая, полученная расчетным путем для времени пребывания 2 мс. Данные по равновесию и кинетике здесь преобразованы в единицы показателя выброса с размерностью г/кг топлива, что позволяет представить величины в форме, исключаяющей их зависимость от степени разбавления воздухом.

Используя показатель выброса, можно дать оценку не только двигателям различной конструкции с различными схемами рециркуляции, но и другим типам энергетических установок. Отметим, что максимальная равновесная величина

на NO_x соответствует значению $\alpha \cong 1,25$ и в 20 раз превышает величину, рассчитанную на основе кинетических ограничений. При $\alpha = 1$ максимальная кинетическая величина NO_x составляет примерно 7,9 г/кг топлива. Поскольку на режимах полной нагрузки камеры работают при $\alpha \approx 3,5$, NO_x , образующийся в первичной зоне при стехиометрических условиях, разбавляется примерно в три раза. При использовании единиц показателя выброса отпадает необходимость в корректировке по разбавлению.

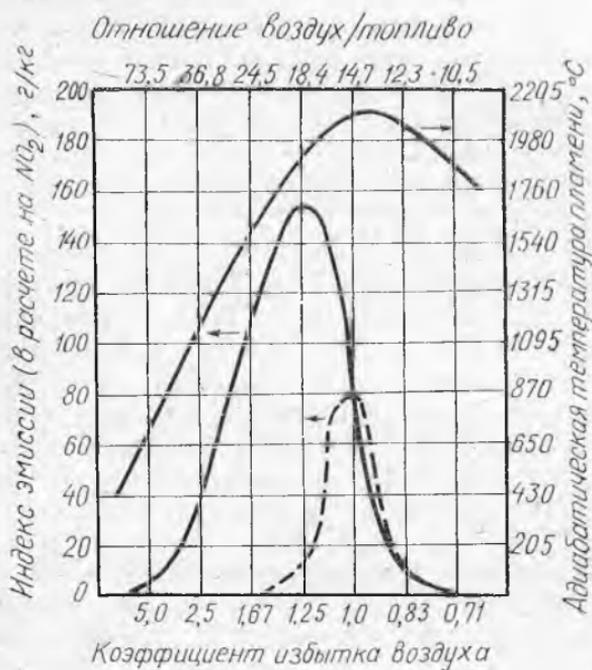


Рис. 13. Равновесные значения NO_x при сжигании топлива letA (подогрев воздуха до 205°C, давление $4 \cdot 10^5$ Па): — равновесие; - - - кинетика при 2 мс (значения увеличены в 10 раз)

Следует отметить, что реализация возможности снижения концентрации NO путем переобогащения смеси связана с рядом трудностей практического характера. Продукты сгорания переобогащенной смеси перед разбавлением должны быть охлаждены воздухом: при отсутствии охлаждения температура при догорании смеси будет возрастать, в результате мо-

жет образоваться большое количество NO . При сжигании переобогащенной смеси в реальной камере иногда возникает необходимость предварительного перемешивания топлива и воздуха, чтобы избежать горения капель при стехиометрическом составе, которое сопровождается образованием большого количества NO_x . Кроме того, для обеспечения необходимой отдачи тепла от переобогащенных продуктов сгорания перед введением в камеру смесительного воздуха потребуется чрезмерно длинная камера.

В процессе горения кроме атмосферного азота источником образования NO является азот, входящий в состав органических компонентов топлива. Экспериментами доказано, что роль азота топлива меняется от основной при низких температурах сгорания до незначительной при высоких. В общем случае при работе авиационного двигателя этот источник NO несуществен, поскольку в топливах для реактивных двигателей содержится менее 50 млн^{-1} (вес) азота, что менее $0,16 \text{ кг NO}$ (в расчете на NO_2) на 1000 кг топлива.

Основную проблему защиты окружающей среды, связанную с выбросами NO_x , фактически создают NO_2 . Приведенные уравнения образования NO важны, потому что именно NO в основном предшествует образованию NO_2 . Двуокись азота, реагируя на свету с углеводородами и озоном, приводит к загрязнению воздуха. Кроме того, NO_2 реагирует с водой, образуя кислоту, которая вызывает коррозию, и поглощает видимый свет, снижая видимость, контрастность и яркость удаленных объектов.

На основе анализа процессов образования окислов азота можно отметить следующее. Поскольку образованию NO_x с термодинамической точки зрения благоприятствуют высокие температуры, а исследования кинетики показывают, что реакция образования NO имеет большую энергию активации ($\sim 115 \text{ ккал/моль}$), образование NO должно происходить в основном в высокотемпературной первичной зоне сгорания. Прежде всего — это область обратного течения. Несмотря на то что смесь в общем случае здесь обогащена горючим, время пребывания ее в этой области сравнительно велико. Вторым очагом образования окиси азота является участок на стыке первичной и вторичной зон, где локальные условия в смеси изменяются от обогащения горючим (первичная зона) до обеднения горючим в зоне разбавления. При этом считается, что влияние давления и концентрации кислорода имеют второстепенное значение. Количество образующейся окиси

азота пропорционально времени пребывания при типовых температурных условиях и резко сокращается, если температура газа падает ниже 2000—2100 К. Далее концентрация NO уменьшается только за счет разбавления воздухом. В процессе охлаждения горячих продуктов сгорания NO замерзает при кинетически предельной концентрации. Скорость диссоциации NO настолько мала, что в обычных камерах сгорания ее можно не учитывать.

Следовательно, чтобы достаточно точно рассчитывать скорость образования окиси азота в продуктах сгорания газотурбинных двигателей, необходимо учитывать основные физические и химические механизмы, действующие в процессе ее образования.

§ 4. ОБРАЗОВАНИЕ И ОКИСЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ТВЕРДОГО УГЛЕРОДА

К настоящему времени кинетика образования углерода изучена недостаточно [18], поэтому рассмотрим качественную картину наиболее важных процессов, происходящих в первичной зоне и приводящих к образованию углерода. Эта картина основана на данных по изучению пламен и объясняет результаты измерений в выхлопных газах, истекающих из камеры сгорания.

Частицы сажи, образующиеся в камере сгорания, являются продуктом неполного сгорания или термического расщепления углеводородного топлива. В ее состав входят вещества, содержащие углерод и водород. Собственно углерод (нагар), образующийся на горячих или холодных поверхностях, имеет отличные от сажи свойства и в настоящей работе не рассматривается.

Сажа, возникающая в светлых пламенах, — мягкая и состоит в основном из конгломератов сферических частиц, имеющих размеры, достаточные для придания видимости дымности выхлопным газам.

В пламенах с меньшей температурой (например, при сжигании газового топлива) сажи образуется меньше. Жидкие углеводородные топлива имеют более высокое соотношение С/Н, и при сжигании стехиометрических смесей вероятность образования сажи выше, чем в газовых пламенах.

Промежуточные продукты реакции горения содержат большое количество различных углеводородов. Однако для

ГТД характерно значительно меньшее содержание различных углеводов (чем, например, в поршневых двигателях), так как процесс сгорания протекает более длительное время и при достаточном количестве кислорода, необходимого для доведения реакции до равновесного состояния.

Рост частиц углерода из углеводородных молекул сопровождается образованием конгломератов. Конгломераты под электронным микроскопом выглядят как сеть пересекающихся цепочек, состоящих из почти сферических частиц. Структурным материалом для конгломератов являются полиацетилены, которые первоначально образуются из свободного углерода как небольшие радикалы и по мере присоединения углерода выступают как тяжелые молекулы.

Упрощенную модель образования свободного углерода в процессе окисления углеводородов $C_m H_n$ при температуре выше 1400 К можно представить в виде уравнения



При $m > 2y$, (т. е., когда атомарное соотношение углерод-кислород выше 1) выделяется твердый углерод, если $m < 2y$, то наблюдается бедное пламя, и свободный углерод не образуется.

Процесс образования сажи из молекул углеводорода — комплексный. Лабораторные исследования показали, что сажа первоначально образуется в форме очень тонких частиц, растущих с большой скоростью. Когда частицы вырастают до диаметра около 10^{-6} см, дальнейшее образование сажи тормозится вследствие окисления ее под действием радикалов OH, образующихся при горении. Концентрация радикалов OH зависит от температуры. Малые концентрации OH, особенно при сгорании богатых смесей, компенсируются их большой реакционной способностью. Таким образом, для устранения дымления необходимо образование большого количества радикалов OH. Если образуется большое количество первичных частиц, то агрегатирование (коагуляция) этих частиц происходит быстрее, чем их окисление радикалами OH, и тогда наблюдается дымный выхлоп.

При исследовании лабораторных пламен с предварительным смещением получено, что при давлениях до 196 н/см^2 (20 кгс/см^2) и коэффициенте избытка окислителя $\alpha > 0,7$ углерода образуется мало. Его количество значительно возрастает с увеличением давления. Данные по ограниченным углеводородным диффузионным пламенам указывают также на

то, что выход углерода увеличивается с ростом избытка горючего и давления. В общем случае углерод можно рассматривать как промежуточный продукт реакции, расход которого чрезвычайно мал по сравнению с основными реакциями в газовой фазе. Так, если углеводородное пламя гасится непосредственно после завершения основных газофазных реакций, как в случае неограниченного диффузионного пламени или пламени предварительно перемешанной смеси типа бунзеновской горелки, реакции окисления углерода зачастую не заканчиваются. В процессе горения в ГТД реакция расхода углерода может «заморозиться» или «не заморозиться» до завершения реакции в зависимости от того, как быстро продукты сгорания будут перемешиваться с охлаждающим воздухом. Следовательно, в общем случае процессы, контролирующие концентрацию твердого углерода и NO_x , подобны. Достигнут эти компоненты своего равновесного значения или нет, зависит от кинетики, чрезвычайно замедленной по сравнению с другими реакциями горения.

Образование твердого углерода происходит в основном в области, непосредственно примыкающей к струе топлива вблизи форсунок. Ввиду недостатка воздуха смесь здесь сильно обогащена горючим, и большая часть топлива сгорает при малых значениях коэффициента α . С повышением уровня давления в камере сгорания угол конуса распыленного топлива уменьшается, степень переобогащения смеси в ограниченной конусом полости увеличивается, и вероятность образования углерода возрастает. Эффективным средством уменьшения выхода частиц дыма является так называемая аэрация топливного факела, осуществляемая путем подачи значительного количества воздуха непосредственно в топливный конус. Таким образом достигается увеличение коэффициента избытка воздуха и улучшается процесс подготовки смеси.

Важным процессом, определяющим количество дыма в выхлопе ГТД, является горение частиц сажи в горячих продуктах сгорания. В общем случае горение твердых частиц — чрезвычайно сложный процесс. Здесь важную роль играет диффузия реагентов к поверхности, десорбция продуктов с поверхности и диффузия продуктов от поверхности. Кроме того, если концентрация частиц достаточно высока, может возникнуть коагуляция малых частиц с образованием больших по размеру. Какое из этих явлений будет — преобладать, зависит от температуры, давления и состава окружающей

частицу среды, а также от размеров частиц и их концентрации.

Размеры частиц в выхлопе ГТД составляют от 0,01 до 0,1 мкм. Форма частиц может быть как правильной сферической, так и неправильной; сгустки неправильной формы могут достигать 1 мкм. Анализ состава частиц показывает, что они более чем на 96% по весу состоят из углерода.

Исследований по выгоранию частиц углерода, размеры которых характерны для выхлопа ГТД, проведено очень мало. Однако, согласно имеющимся данным, процессы диффузии незначительно влияют на скорость горения сажи с диаметром частиц менее 25 мкм. При проведении экспериментов отмечалось, что влияние коагуляции невелико также в тех зонах пламени, где происходит интенсивное окисление частиц. Роль коагуляции заметно проявляется лишь на этапе образования углерода. Изучение процессов окисления сажи в газообразных продуктах сгорания при различных коэффициентах избытка воздуха, давлениях и температурах [18] позволило найти расчетные зависимости, позволяющие оценить скорость реакции «дожигания» углерода. Так, изменение удельной скорости реакции в зависимости от парциального давления можно записать в виде

$$\omega = 1,085 \times 10^4 (P_{O_2} / T^{1/2}) \exp(-39300/RT), \quad (12)$$

где ω — удельная скорость реакции, г-см/с;

P — парциальное давление кислорода, N/cm^2 9,8.

Исходя из предположения, что радикал ОН оказывает более существенное (чем P_{O_2}) влияние на реакцию окисления и некоторая доля (n) соударений радикалов ОН с поверхностью частиц приводит к выбиванию атома углерода, была получена другая зависимость для удельной скорости реакции:

$$\omega = 1,27 \cdot 10^2 n P_{OH} / T^{1/2}, \quad (13)$$

где P_{OH} — парциальное давление радикалов ОН, $n \approx 0,1$.

Предполагается также, что удельная скорость реакции должна линейно зависеть от парциального давления CO_2 при температурах 1800—1940 К. Несмотря на то, что выражения (12) и (13) справедливы для более низких температуры и парциального давления кислорода, чем это имеет место в камере ГТД, они позволяют оценить хотя бы в первом приближении способность камеры сгорания дожигать образующийся в ней углерод.

На рис. 14 представлены расчетные скорости горения частиц сажи в продуктах сгорания $C_n H_{2n}$ в воздухе при условиях, типичных для ГТД (начальная температура воздуха — 700 К, давления — 147 н/см²) в зависимости от коэффициента избытка воздуха в смеси газообразных продуктов. Данные представлены в виде скорости выгорания поверхности:

$$\frac{dr}{dt} = -10^4 \omega / P_s, \quad (14)$$

где dr/dt — скорость выгорания поверхности, мкм/с; P_s — плотность сажи, г/см³ ($P_s \approx 2,25$ г/см³).

Для сферической частицы dr/dt — скорость изменения радиуса. Несмотря на то, что расчеты дают значительное расхождение как раз в наиболее важной для ГТД области $0,9 < \alpha < 1,4$, они все-таки имеют сравнимый порядок величины.

Полученные скорости горения показывают, что значительное количество сажи, образующейся в богатых горючим областях первичной зоны, может расходоваться в других областях этой зоны и во вторичной зоне. Например, радиус сферической частицы, пребывающей 3 мс в продуктах почти стехиометрического состава в первичной зоне, изменяется приблизительно на 0,1 мк. Размеры частиц несферической формы могут изменяться более значительно. Сравнение расчетных изменений радиусов с наблюдаемыми размерами частиц указывает на то, что окисление углерода играет важную роль при определении уровня задымленности выхлопа. Чтобы достичь выходного сечения двигателя и не быть израсходованной, частица сажи должна большую часть времени находиться в относительно холодных зонах камеры сгорания вблизи жаровой трубы.

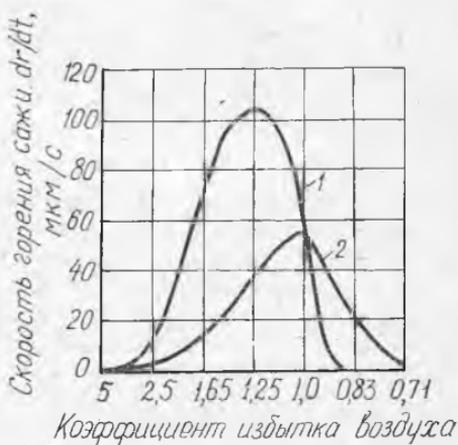


Рис. 14. Скорость горения частиц сажи в продуктах адиабатического процесса горения керосина $C_n H_{2n}$ и воздуха при 700 К и 147 н/см² (15 кгс/см²): 1, 2 — рассчитанные соответственно по уравнениям (12) и (13)

§ 5. ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСИ УГЛЕРОДА И УГЛЕВОДОРОДОВ

Присутствие в продуктах сгорания несгоревших окислов углерода и углеводородов свидетельствует о незавершенности процесса горения в камере. Сложный процесс окисления углеводородов может быть условно подразделен на три стадии [20]. Вначале образуются легкие, не полностью окисленные углеводороды типа формальдегида, ацетальдегида, формула (НСО), органических перекисей и т. д. Затем протекают реакции с образованием больших количеств H_2O и CO . Наиболее важной реакцией, приводящей к образованию CO , является реакция $H_2CO + OH \rightleftharpoons H_2O + CO + H$. Конечная стадия, особенно для горения с недостатком топлива, характеризуется в основном превращением CO в CO_2 , главную роль в окислении CO играет реакция $CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H$.

Первичное окисление топлива с образованием окиси углерода и углеводородов происходит вблизи головки камеры сгорания в области возвратных течений. Доокисление до конечных продуктов осуществляется либо в первичной зоне (при обедненных смесях), либо во вторичной зоне, куда дополнительно подводится воздух (для богатых смесей).

При горении богатых топливных смесей окись углерода является одним из основных компонентов конечных продуктов сгорания, для бедных смесей она является промежуточным соединением. Поэтому концентрация CO в послепламенной зоне должна быть близка к термодинамически равновесному значению. Действительно, сопоставление зависимостей содержания CO от состава смеси для ламнарного и турбулентного пламени с термодинамически равновесными значениями (рис. 15) подтверждает указанную особенность [21].

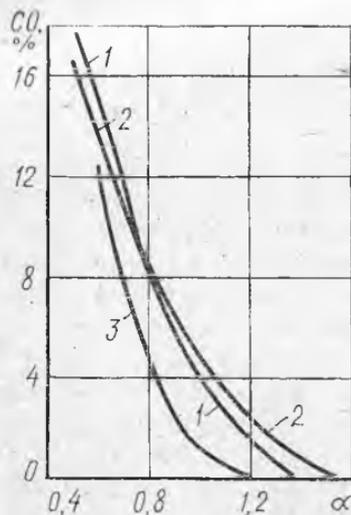


Рис. 15. Содержание окиси углерода в продуктах горения с различными типами пламени: 1 — равновесный состав; 2 — турбулентное пламя; 3 — ламнарное пламя

На процессы образования СО и НС большое влияние оказывает степень предварительного испарения и перемешивания топлива с воздухом. Установлено [21], что наименьших концентраций СО можно достичь при горении жидкого топлива в виде относительно крупных капель при малых скоростях испарения и перемешивания в условиях бедного состава смеси. Концентрации несгоревших углеводородов уменьшаются при горении с предварительным перемешиванием или при горении бедных смесей с каплями небольших размеров.

§ 6. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ВЫХОД ТОКСИЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Из предыдущего анализа ясно, что наибольшее влияние на образование и выброс токсичных соединений оказывают: состав смеси в первичной зоне, температура и давление на входе в камеру, время пребывания и степень перемешивания топливо-воздушной смеси в первичной зоне камеры сгорания. Рассмотрим влияние каждого фактора в отдельности.

Т а б л и ц а 2

Размеры, мм	Камера А	Камера Б
D_c	211	112
D_L	173	89
L_p	86	16
L_l	86	46
L_D	198	112

Состав смеси в первичной зоне. Регулирование состава смеси в первичной зоне можно осуществить перераспределением воздуха путем изменения геометрии элементов жаровой трубы. Эксперименты на опытной камере сгорания, схема которой приведена на рис. 16, показали, что от величины коэффициента избытка воз-

духа существенно зависит выход NO_x , СО и НС.

В табл. 2 указаны основные геометрические размеры двух модификаций камеры сгорания. Пример подобных зависимостей для двух вариантов камеры приведен на рис. 17. Здесь коэффициент избытка воздуха рассчитан по средней величине расхода, которая определялась как сумма расходов воздуха через форсунку, завихритель и часть (40%) расхода, поступающего в жаровую трубу через отверстия вторичной зоны. Максимальные значения α в данном случае соответствуют

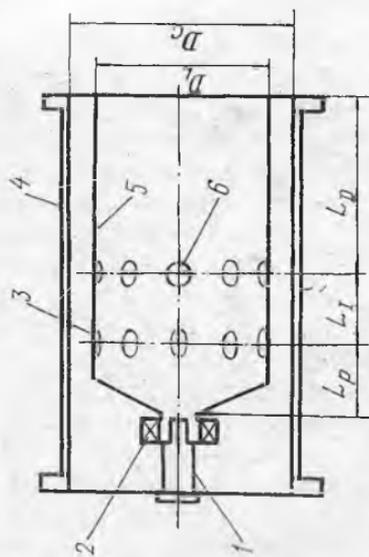
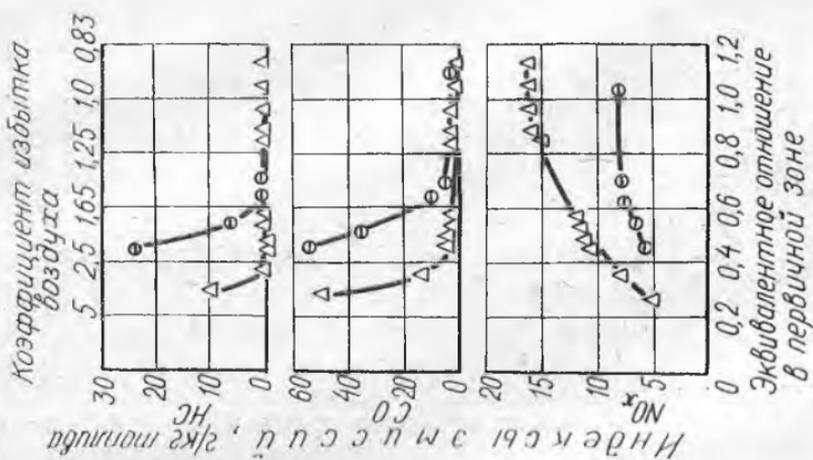


Рис. 16. Схема камеры сгорания: 1 — пневматическая форсунка; 2 — радиальный завихритель с регулируемой площадью сопла; 3 — отверстие с регулируемой площадью для входа вторичного воздуха; 4 — корпус; 5 — жаровая труба; 6 — отверстия смесительной зоны

Рис. 17. Типичная зависимость выбросов камеры сгорания от состава смеси в первичной зоне: $\Delta - P_k = 410 \text{ кН/м}^2$; $T_k = 760 \text{ К}$; $\Delta P_L = 2,5\%$; $\tau_n = 30 \text{ мс}$; τ_n — соответственно 540; 1,2; 18

моменту непосредственно перед бедным срывом. Как следует из рис. 17, выбросы NO_x максимальны для смеси, состав которой близок к стехиометрическому, и постепенно уменьшаются с увеличением α . Выбросы CO и HC , напротив, остаются примерно постоянными и относительно низкими в широком диапазоне изменения α и затем резко увеличиваются с приближением к пределу бедного срыва. Сравнение кривых для CO и HC показывает, что рост выбросов CO начинается при более низком значении α и менее резко, чем выбросов HC . Это объясняется различием скоростей реакций окисления CO и углеводородов и различной относительной чувствительностью этих реакций к уменьшению температуры пламени при увеличении α .

Температура и давление на входе в камеру. Уровни давления и температуры на входе в камеру в первую очередь воздействуют на кинетическое и химическое равновесие реакций, происходящих в зоне горения. Влияние этих параметров на выбросы NO_x и CO показано на рис. 18. Как и следовало ожидать, увеличение P_k и T_k при сохранении постоянного значения α в первичной зоне приводит к увеличению показателя выбросов NO_x и к уменьшению выбросов CO в целом. Очевидно, что при более высоких значениях P_k и T_k существенно расширяются пределы стабилизации пламени по α , поэтому минимально достижимые выбросы NO_x при высоких значениях P_k и T_k несколько ниже. Отсюда следует, что параметры на входе в камеру сильнее воздействуют на пределы ста-

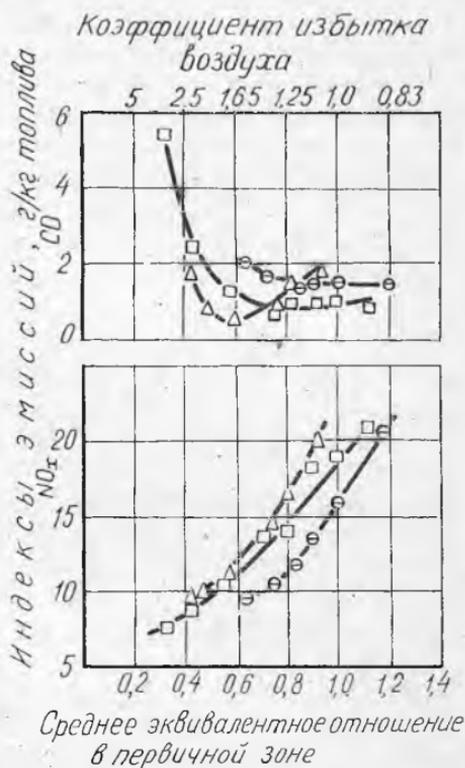


Рис. 18. Влияние параметров на входе в камеру на выбросы NO_x и CO (камера А, $\Delta P_L = 9,6 \text{ кН/м}^2$, $\tau_{\text{н}} = 20 \text{ мс}$): \ominus — $P_k = 280 \text{ кН/м}^2$; $T_k = 760 \text{ К}$; \square — соответственно 410, 760; \triangle — соответственно 280, 900

билизации пламени, чем на образование NO_x . Для способа подачи топлива с помощью пневматической форсунки такое явление обусловлено не только влиянием реакции горения на кинетику, но и улучшением распыления и испарения капель топлива при высоких температуре и давлении. Увеличение скорости испарения капель в первичной зоне способствует увеличению относительного времени пребывания смеси и улучшению стабильности горения топлива.

Время пребывания в первичной зоне. Для заданных параметров потока степень завершения различных реакций в камере зависит от времени пребывания τ_n горячих газов в первичной зоне. С точки зрения снижения эмиссий — это важнейший фактор. Вследствие сложности структуры течения первичная зона характеризуется спектром значений времени пребывания. Однако при изучении суммарного влияния времени пребывания на выход токсичных компонентов полезно определить номинальное значение τ_n , рассчитываемое по параметрам на входе в камеру и полному расходу воздуха

в первичной зоне. Эта величина и служит мерой общего уровня спектра времени пребывания.

Влияние времени пребывания на выбросы NO_x и CO показано на рис. 19. Различные значения τ_n , соответствующие двум кривым, получены путем изменения относительного расхода воздуха в первичную зону. Влияние τ_n на выбросы NO_x практически при всех значениях α несколько слабее линейного. С другой стороны, различие выбросов CO , соответствующих различным значениям τ_n , относительно мало при малых α и значительно увеличивается для бедных смесей, т. е., если рассматривать бедные смеси, то на выбросы CO начальная скорость разбавления газа воздухом влияет сильнее, чем τ_n . Во всяком случае, данные, при-

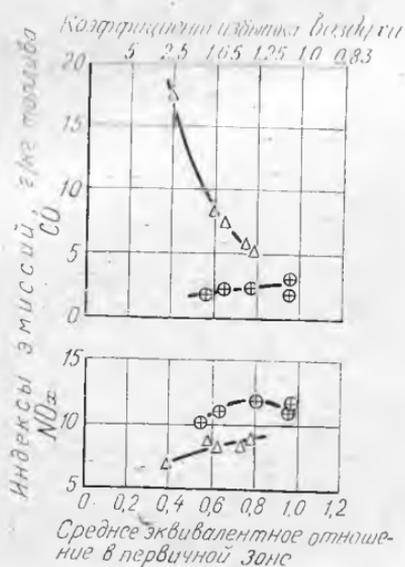


Рис. 19. Влияние времени пребывания в первичной зоне на выбросы NO_x и CO (камера В, $P_k = 47 \text{ кН/м}^2$, $T_k = 640 \text{ К}$, $\Delta P = 2\%$): Δ — $\tau_n = 8$; \oplus — $\tau_n = 14 \text{ мс}$

веденные на рисунке, свидетельствуют о том, что влияние τ_n на выбросы СО значительно сильнее, чем на выбросы NO_x . Отсюда следует, что регулирование расчетного значения τ_n — возможный эффективный путь компромисса между выбросами NO_x и СО.

На основе довольно простых рассуждений можно заключить, что увеличение времени пребывания в первичной зоне приведет к увеличению значения α , при котором происходит срыв пламени. Рис. 19 не подтверждает этого, так как испытания при более высоких значениях τ_n не предусматривали подробного исследования рабочего режима, близкого к срыву пламени. Тем не менее, известны результаты, свидетельствующие о том, что увеличение τ_n приводит, как и предполагалось, к расширению диапазона работы камеры по бедному срыву.

Необходимость сжигания топлива при бедном составе смеси усложняет проблему срыва пламени и связанную с этим задачу достижения низкого уровня выбросов СО и НС. Поскольку время пребывания на срыв пламени и на выбросы СО и НС влияет сильнее, чем на выбросы NO_x , то для получения стабильного горения и общего низкого уровня выбросов камеру сгорания следует проектировать с относительно высоким τ_n . Увеличение τ_n может быть достигнуто путем увеличения размеров первичной зоны или степени рециркуляции, или обоими способами одновременно. Достигнуть удовлетворяющий нормам уровень выбросов при работе камеры около пределов бедного срыва пламени возможно, только применяя комплекс мероприятий, к которым относятся: увеличение τ_n , регулирование параметров первичной зоны, изменение геометрии камеры и соответствующая организация системы впрыска и смещения топлива.

Степень перемешивания топливо-воздушной смеси. В качестве меры однородности топливо-воздушной смеси в первичной зоне принимается параметр S , называемый степенью несмешанности. Параметр S определяется как отношение среднеквадратичного отклонения функции распределения величины α к среднему значению величины $\alpha_{\text{ср}}$. В соответствии с этим уменьшение S соответствует улучшению равномерности распределения топливо-воздушной смеси, а значение $S = 0$ соответствует полностью перемешанной смеси.

Очевидно, что идеальным случаем явилось бы предварительное испарение топлива и полное перемешивание его с

требуемым для горения количеством воздуха перед подачей в первичную зону. Однако этот метод подготовки топлива усложняет задачу предотвращения проскока пламени и обеспечение пути смешения, достаточного для полного испарения топлива при одновременном обеспечении гарантии отсутствия самовоспламенения топливо-воздушной смеси. Другим способом, противоположным предварительному перемешиванию, является впрыск топлива непосредственно в камеру и перемешивание в первичной зоне перед началом горения. В этом случае топливоподающая форсунка должна обеспечивать тонкое распыливание топлива и быстрое его распределение в потоке воздуха. Кроме того, особое внимание должно уделяться аэродинамике течения в первичной зоне, гарантирующей интенсивное перемешивание.

Итак, степень равномерности перемешивания смеси зависит от способа впрыска топлива и степени аэродинамического перемешивания. Влияние этих двух факторов на перемешанность можно оценить следующим выражением:

$$S = K_1 S_{\phi} + K_2 e^{-K_3 \sqrt{\Delta P_L / F_{\text{кк}}}}, \quad (15)$$

где S_{ϕ} — величина, зависящая от системы впрыска топлива;
 K_1, K_2, K_3 — константы;

ΔP_L — потери давления в камере;

$F_{\text{кк}}$ — характерная площадь камеры.

Степень влияния системы впрыска топлива на общий уровень перемешивания зависит от того, как быстро топливо распределяется по потоку воздуха, протекающего вблизи топливной струи, и какую часть первичного потока представляет этот воздух. Из уравнения (15) следует, что влияние аэродинамического перемешивания определяется главным образом потерями давления в жаровой трубе.

Если бы главным источником неоднородности смеси в первичной зоне являлось аэродинамическое перемешивание, то можно было бы ожидать, что увеличение перепада давления на жаровой трубе окажет заметное влияние на выбросы NO_x . В действительности экспериментальные данные показывают определенное влияние ΔP , но это влияние выражено в слабой степени. Так, увеличение перепада давления почти в три раза приводит к уменьшению выбросов NO_x всего на $\sim 10\%$.

Значительного улучшения перемешивания можно достичь путем увеличения расхода воздуха и перепада давления на

форсунке при сохранении неизменным перепада давления на жаровой трубе [22]. Увеличение расхода воздуха преобразует пневматическую форсунку (в которой обычно используется

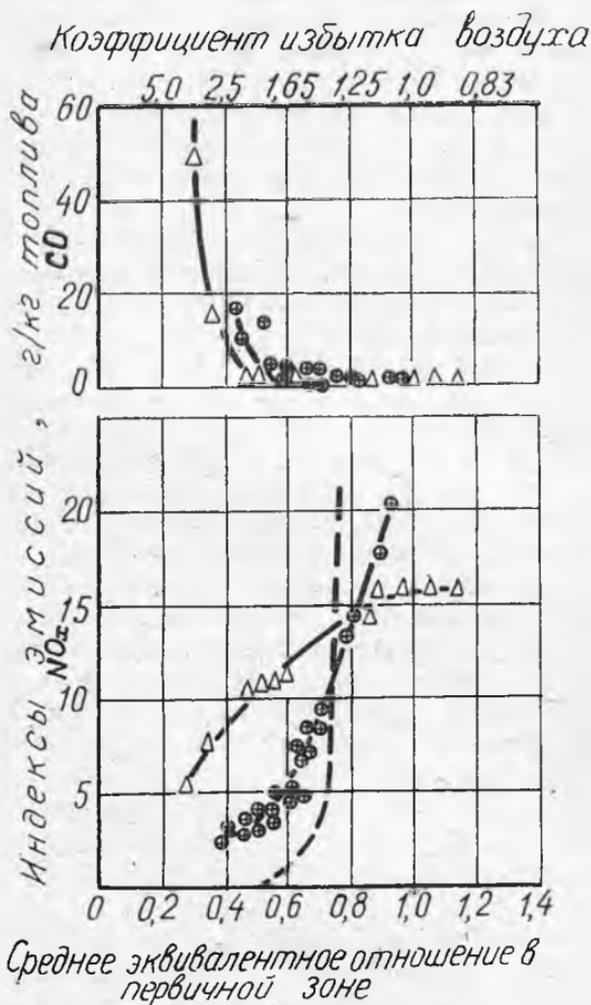


Рис. 20. Влияние степени перемешивания в первичной зоне на выбросы NO_x и CO (камера А, $P_k = 410 \text{ кн/м}^2$, $T_k = 760 \text{ К}$, $\Delta P_L = 2,5\%$; $\tau_n = 30 \text{ мс}$): Δ — $P_{\text{ф}}/P_{\text{вх}} = 2,5\%$; $G_{\text{в}}/G_{\text{т}} = 4$ (плохое перемешивание); \oplus — соответственно — 14, 10% (хорошее перемешивание); — — — идеальное перемешивание

имеющийся перепад давления на жаровой трубе) в форсунку с аэрацией топливного факела, в которой перепад давления выше, чем на жаровой трубе.

Влияние степени перемешивания топлива на выбросы показано на рис. 20. Для сравнения на рисунке приведены результаты испытаний исходной камеры, а также результаты аналитической оценки выбросов NO_x для случая идеального перемешивания. Из рисунка видно, что форма кривой, характеризующей выбросы NO_x для модифицированной камеры, приближается к кривой, соответствующей однородной перемешанной смеси в первичной зоне.

Улучшение перемешивания характеризует более крутая кривая зависимости выбросов NO_x от α . Выбросы увеличиваются при низких значениях α и значительно (почти в 4 раза) уменьшаются в области бедных смесей. Кривые на рис. 20 объясняют компромисс между выбросами CO и NO_x . Действительно, экстраполяция полученных кривых показывает, что сочетание интенсификации перемешивания с улучшением стабилизации пламени при более высоких α приводит к дальнейшему снижению общего уровня выбросов. Во всяком случае, очевидно, что качество перемешивания системы подачи топлива оказывает основное влияние на выбросы. Таким образом, повышение однородности топливо-воздушной смеси в первичной зоне является важнейшим условием получения низкого уровня выбросов, а совершенствование конструкции системы подачи топлива может рассматриваться как одно из наиболее эффективных средств достижения этой цели.

**МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ
ВЫХОДА ТОКСИЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ПУТЕМ МОДИФИКАЦИИ
КАМЕР СГОРАНИЯ И ТОПЛИВА**

В настоящее время разработка мер по снижению выбросов токсичных соединений ведется в двух направлениях: 1 — путем незначительных модификаций существующих камер сгорания (перераспределение потоков воздуха, использование новых систем распыления топлива, интенсификация процессов перемешивания турбулизацией потока, впрыск воды в камеру или применение топливных присадок); 2 — коренной перестройкой камер сгорания (применение систем предварительного подогрева, испарения и смешения топлива, многозонной подачи топлива, камер с изменяемой геометрией и каталитической камеры сгорания).

Оптимальная с термохимической точки зрения камера сгорания должна обеспечивать предварительное испарение жидкого топлива, полное перемешивание паров с воздухом и устойчивое сгорание при минимальном времени пребывания бедной гомогенной смеси. Удовлетворить в полной мере всем этим требованиям одновременно невозможно.

В настоящее время осуществляется широкий поиск конструктивных форм камер сгорания, которые соответствовали бы нормам по загрязнению окружающей среды. Подходы к решению этой задачи отличаются широким разнообразием. В этой главе дан краткий анализ наиболее перспективных схем камер сгорания, предназначенных для авиационных ГТД.

§ 1. ВИХРЕВАЯ КАМЕРА СГОРАНИЯ

Камера сгорания *Vorbix* (Пратт-Уитни, США).

В любой камере сгорания процесс перемешивания условно может быть подразделен на три этапа:

— грубое перемешивание локальным вдувом воздуха через стенки жаровой трубы и путем организации циркуляционного течения за стабилизатором пламени;

— перемешивание в несколько меньшем масштабе турбулентностью, генерируемой в зонах высоких касательных напряжений, обусловленных относительным перемещением потоков газа;

— перемешивание на молекулярном уровне в процессе диссипации кинетической энергии турбулентного движения.

Таким образом, перемешивание во всем диапазоне масштабов должно осуществляться каскадным рассеянием энергии, первоначально содержащейся в высокоскоростных струях воздуха. Эта энергия пропорциональна перепаду давления на стенках жаровой трубы. Временной масштаб процесса каскадной диссипации энергии зависит от размерного масштаба потока и кинетической энергии турбулентности. Оценки Марковски, Ломан, Рейли [23] свидетельствуют о том, что для камеры авиационного ГТД характеристический временной масштаб каскадного рассеяния турбулентной энергии до полной диссипации или перемешивания на молекулярном уровне составляет ~ 10 мс. Это значительно больше характеристического времени реакции горения, и, следовательно, процесс аэродинамического перемешивания ограничивает степень приближения реакции к налагаемому кинетикой пределу идеального горения.

Значительно уменьшить время перемешивания вплоть до уровня, сравнимого с кинетическим временным масштабом, удалось в вихревой камере сгорания *Vorbix* (в переводе означает «вихревое сжигание и перемешивание»), схема которой показана на рис. 21. Она представляет собой камеру со вспомогательной горелкой (форкамерой) и двухступенчатой системой подачи топлива. Небольшая часть воздуха, участвующего в горении, подводится во вспомогательную горелку, обеспечивающую подогрев рабочего тела на режимах малого газа. На режимах высокой мощности дополнительное топливо через вторую топливную систему подводится в продукты сгорания вспомогательной горелки, а оставшийся воздух вво-

дится в основную зону горения в виде высокоскоростных закрученных струй.

Сочетание быстрого испарения основной части топлива и высокой скорости перемешивания с помощью закрученных струй воздуха, подаваемых в зону горения, а также контролируемое воспламенение полученной смеси с помощью вспо-

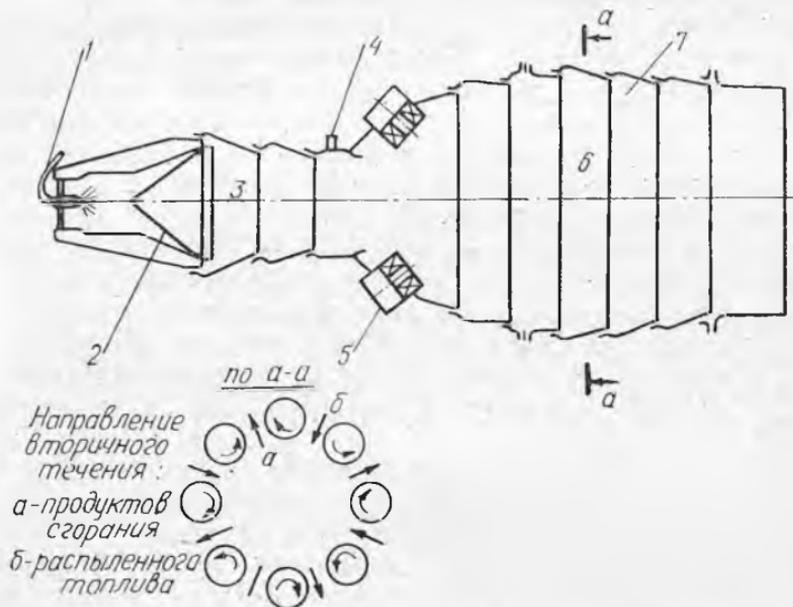


Рис. 21. Схема трубчатой вихревой камеры сгорания 1 Т8Д: 1 -- вспомогательная форсунка; 2 -- стабилизатор пламени; 3 -- вспомогательная зона горения; 4 -- форсунки для вторичного топлива; 5 -- вихревые трубки; 6 -- основная зона горения; 7 -- смесительный воздух

могательной горелки обеспечивают достаточно хорошие характеристики вихревой камеры.

Подача в зону горения воздуха в виде закрученных струй создает, благодаря присущей закрученным потокам неустойчивости, условия для высокой скорости перемешивания не только в зоне предварительного перемешивания, но и во всей зоне горения. При взаимодействии холодных закрученных струй с горячими продуктами сгорания под влиянием центробежных сил происходит потеря устойчивости поверхности раздела потоков. Более плотный воздух, обладающий большим моментом количества движения, внедряется в радиаль-

ном направлении в менее плотный горячий газ, обладающий слабым или нулевым количеством движения. Таким образом, в данном случае скорость перемешивания обусловлена не только силами сдвига при относительном движении потоков, но, главным образом, поверхностной неустойчивостью течения, благодаря которой моли воздуха внедряются в окружающую среду под влиянием центробежных сил.

В дополнение к такому макроперемешиванию использование закрученного течения в зоне горения увеличивает скорости перемешивания и на уровне более мелких масштабов из-за усиления генерации турбулентности за счет энергии основного течения. Исследования динамики турбулентных закрученных потоков показывают [24], что энергия турбулентности в закрученном потоке имеет более высокий уровень и генерируется с более высокой скоростью. Подобное увеличение скорости генерирования энергии турбулентности за счет уменьшения энергии основного движения теоретически означает, что процесс каскадной диссипации энергии происходит быстрее, а характеристическое время перемешивания уменьшается до уровня, близкого к кинетическому временному масштабу.

В целях управления интенсивностью перемешивания в конструкции вихревой камеры предусмотрено использование направления вращения струй воздуха в вихревых трубках. На рис. 20 показано, каким образом пары противоположно закрученных струй генерируют противоточное движение продуктов сгорания и распыленного топлива.

Непосредственный впрыск топлива в продукты сгорания вспомогательной горелки, казалось бы, должен приводить к сгоранию отдельных капель, разложению топлива и образованию большого количества сажи и частиц углерода по схеме, изложенной в первой главе. Однако в вихревой камере этого не происходит потому, что воздух, выходящий из вспомогательной горелки, загрязнен продуктами сгорания, концентрация кислорода в которых уменьшена. Как показывают эксперименты, даже небольшое загрязнение воздуха может препятствовать горению капель и увеличивать время задержки воспламенения. Когда капли топлива в зоне горения сталкиваются с закрученными струями воздуха и попадают в области повышенной концентрации кислорода, они могут гореть. Однако предполагается, что при высоких скоростях перемешивания в этих зонах пары топлива будут сдуваться с капель и они не загорятся. В самом деле, процесс сдувания па-

ров в сочетании с высоким уровнем температуры предварительного подогрева продуктов сгорания должен привести к исключительно высокой скорости испарения капель топлива.

Необходимо подчеркнуть, что время процесса предварительного перемешивания ограничено, и после достижения некоторой степени перемешивания (и по истечении определенного времени задержки воспламенения) смесь в локальных зонах будет самовоспламеняться. Расчетные оценки показывают, что самовоспламенение при высоком уровне температуры должно происходить приблизительно через 1 мс после непосредственного контакта топлива с воздухом. Следовательно, относительное осевое расстояние от места впрыска топлива до закрученных струй, аэродинамические характеристики этих струй и температура газов, выходящих из вспомогательной горелки,—это параметры, которые регулируются с целью получения оптимальных времени задержки воспламенения и степени предварительного перемешивания. Высокоскоростные процессы испарения и перемешивания веществ практически на молекулярном уровне позволяют достичь требуемого протекания процесса горения с конечными концентрациями, приближающимися к таковым для идеально перемешанной бедной смеси.

Поскольку процесс горения в основной зоне возникает самостоятельно, стабилизатор пламени с рециркуляцией потока не требуется. В отсутствие специально организованного рециркуляционного течения поток заполняет всю зону горения, поэтому эффективное время пребывания можно регулировать выбором подходящих средних скоростей и длины зоны горения до места ввода смесительного воздуха.

Результаты испытаний двух модификаций вихревых камер-трубчатой камеры типа *IT8Д*, схема которой дана на рис. 21, и кольцевой камеры типа *IT4* (рис. 22), приведенные при взлетных расходах воздуха, температуре на входе 666 К и давлении $\sim 1,3 \cdot 10^5\text{ Па}$, представлены на рис. 23.

Из приведенных данных видно, что на режимах высокой мощности концентрации окислов азота в продуктах сгорания трубчатой вихревой камеры *IT8Д* и кольцевой камеры *IT4* составляют около трети концентрации для обычных камер. В то же время концентрации окиси углерода и несгоревших углеводородов для вихревых камер в общем выше, чем для обычных. Такое соотношение между концентрациями окиси углерода и окислов азота можно объяснить недостаточным для полного сгорания топлива временем пребывания в зоне

реакции. Тем не менее, концентрация несгоревших углеводов довольно низка в широком диапазоне состава смеси. Этот факт отражает эффективность высоких скоростей испарения и распределения топлива, достигаемых при использовании вспомогательной горелки, а также интенсивном переме-

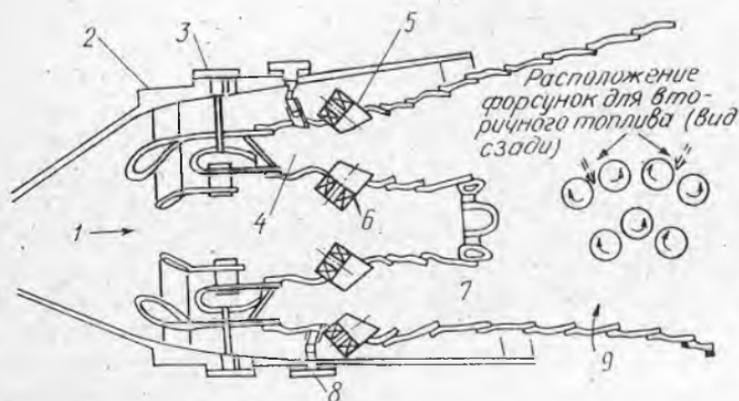


Рис. 22. Схема кольцевой вихревой камеры сгорания IT-4: 1 — поток воздуха; 2 — корпус диффузора; 3 — вспомогательная форсунка; 4 — вспомогательная зона горения; 5 — десять пар вихревых трубок; 6 — пять пар вихревых трубок; 7 — основная зона горения; 8 — форсунки для вторичного топлива; 9 — смешительный воздух

шивании в начале основной зоны горения. На взлетном режиме в обеих камерах сгорания число дымности по Брандту составило 5.

В работе [23] приведены также данные по испытаниям обычной и вихревой камер типа IT-4 при температуре и давлении на входе, соответствующих условиям работы полноразмерного реального двигателя. Эти испытания проводились с целью экспериментального определения влияния давления на образование выбросов в вихревой камере. С целью увеличения диапазона устойчивой работы вспомогательная горелка была заменена горелкой с обычным вихревым стабилизатором.

Результаты этих опытов показаны на рис. 24. Как видно из рисунка, обе камеры имеют одинаковый уровень выбросов CO и HC на режиме высокой мощности, однако, выбросы окислов азота вихревой камерой составляют 47% от значения для обычной камеры (при общем $\alpha \approx 6$). Графики

свидетельствуют о высокой устойчивости горения в вихревой камере. При $\alpha \approx 6$ полнота сгорания превышает 99%, несмотря на то, что концентрация CO в этой точке в 10 раз превышает содержание окиси углерода на режимах высокой мощности. Горение с предварительным подогревом смеси до температуры самовоспламенения является, по-видимому, очень устойчивым, поэтому срыва пламени не наблюдается. Следовательно, стабилизация пламени в основной зоне горения зависит только от способности вспомогательной горелки обеспе-

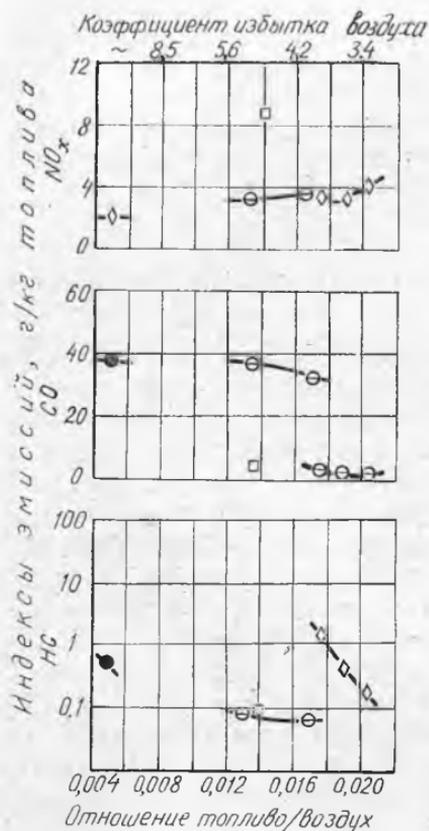


Рис. 23. Характеристики выбросов вихревых камер при низком давлении ($P = 1,3 \cdot 10^5$ Па, $T = 393^\circ\text{C}$): \diamond — вихревая камера I T8Д; \circ — вихревая камера I T4; \bullet — работа со вспомогательной горелкой; \square — обычная камера I T8Д

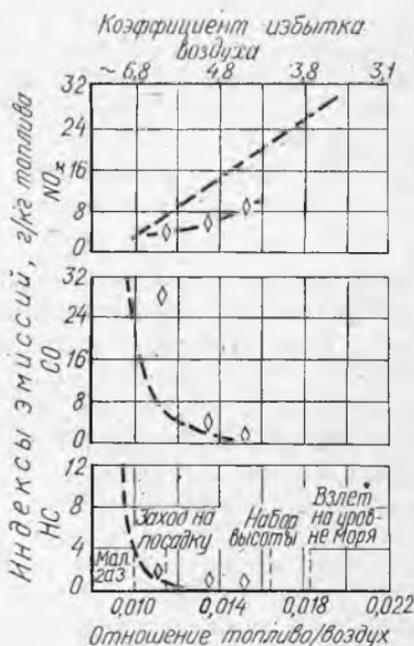


Рис. 24. Характеристики выбросов из вихревой камеры сгорания I T8Д при высоком давлении (температура и давление на входе соответствуют рабочим условиям двигателя): — — — — обычная камера сгорания I T8Д; \diamond — трубчатая вихревая камера сгорания I T8Д

чивать энергию, достаточную для самовоспламенения. Срыв пламени в такой камере при обеднении смеси полностью определяется условиями стабилизации пламени во вспомогательной горелке.

Сравнение данных, приведенных на рис. 23 и 24, показывает, что с повышением давления характеристики камеры несколько изменяются: уменьшаются выбросы окиси углерода и увеличиваются выбросы окислов азота. Этот результат полностью согласуется с теоретическими зависимостями образования указанных компонентов от давления, как это было отмечено в I главе.

Таким образом, предварительный подогрев и закрутка потока позволили в рассмотренной конструкции камеры решить проблему повышения интенсивности перемешивания реагирующей смеси, максимально приблизиться к процессу горения, ограниченному кинетикой химической реакции, и в конечном итоге существенно уменьшить выход токсичных соединений.

§ 2. КАМЕРА СГОРАНИЯ С ВИХРЕВЫМИ МОДУЛЯМИ

Идея построения камеры сгорания с вихревыми модульными горелками (или форсунками) является, пожалуй, наиболее перспективной для создания малотоксичного двигателя. Впервые вихревые модули были разработаны в СССР и применены в двигателе НК-8. Позднее в США по программе NASA были разработаны аналогичные камеры сгорания с вихревыми модулями несколько иной конструкции [10]. Поскольку основные характеристики вихревых модулей по выбросам загрязняющих веществ в зарубежной литературе освещены более подробно, данные по вихревым модулям рассмотрим на примере камер NASA.

Камера сгорания кольцевого типа (рис. 25) содержит 120 вихревых модульных горелок, равномерно расположенных по периметру трех концентрических окружностей (контуров). Расход топлива в каждый контур регулируется независимо друг от друга.

Основная часть воздуха (93—96%) подается через фронтное устройство, остальной расход идет на охлаждение стенок жаровой трубы.

Схема типичной модульной горелки показана на рис. 26. Каждый модуль состоит из трех частей: карбюратора, завихрителя и стабилизатора пламени. Стабилизатор может быть

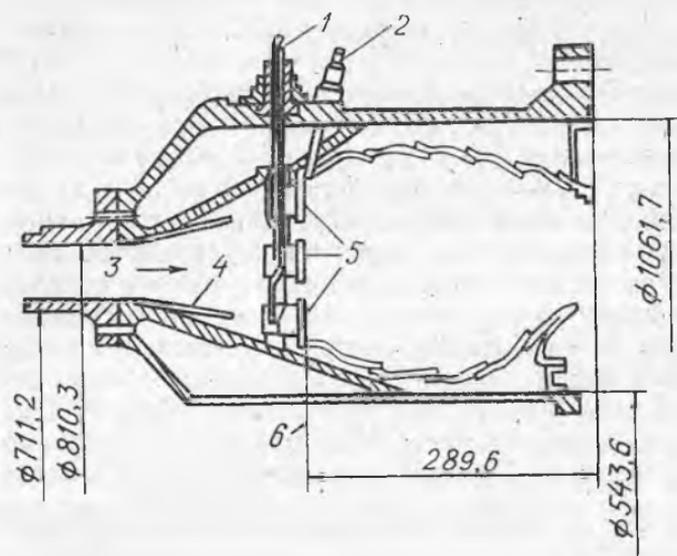


Рис. 25. Кольцевая камера сгорания с вихревыми модулями (размеры даны в мм): 1 — подвод топлива; 2 — свеча зажигания; 3 — подвод воздуха; 4 — диффузорная вставка; 5 — набор из 120 модульных горелок; 6 — плоскость впрыска топлива

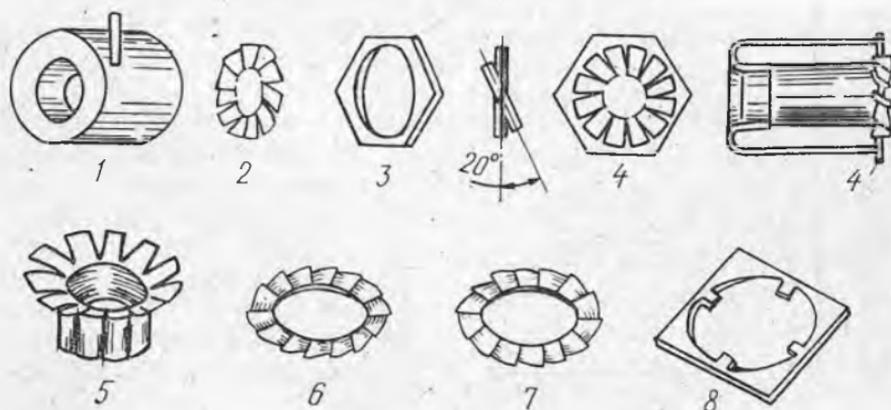


Рис. 26. Детали модульной горелки с различными стабилизаторами пламени: 1 — карбюратор; 2 — завихритель; 3 — стабилизатор пламени; 4 — плоский стабилизатор пламени; 5 — конический завихритель с противоположно направленной закруткой; 6 — плоский завихритель с противоположно направленной закруткой; 7 — плоский завихритель с закруткой, совпадающей с закруткой стабилизатора; 8 — пластина с кольцевым вырезом

либо плоским, либо с закруткой. При этом направление закрутки может совпадать или быть противоположным закрутке основного завихрителя.

Во время работы в модульной горелке одновременно протекает несколько процессов: распыление и предварительное перемешивание топлива с воздухом в карбюраторе; закрутка потока смеси и стабилизация пламени в следе за горелкой. Кроме того, каждая горелка обеспечивает перемешивание воздуха, проходящего через фронтное устройство между модульными горелками, с высокотемпературными продуктами сгорания в следе за горелками. С целью интенсификации перемешивания и уменьшения времени пребывания газов в наиболее горячей части зоны циркуляции было испытано несколько типов стабилизаторов (рис. 26). Наилучшие результаты по снижению выбросов NO_x показали стабилизаторы с закруткой воздуха, противоположной закрутке потока смеси.

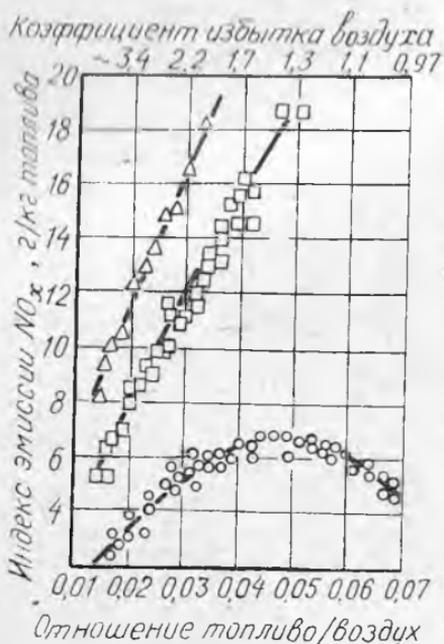


Рис. 27. Влияние температуры на входе в камеру и состава смеси на образование окислов азота при температуре на входе: \circ — 589; \square — 755; \triangle — 839 К

Влияние входных параметров — температуры воздуха и состава смеси на образование NO_x в вихревой камере при давлении $5 \cdot 10^5$ — $6 \cdot 10^5$ Па (5 — 6 кгс/см²), расходе воздуха 38,7—50 кг/с показано на рис. 27 [25]. Из рисунка видно, что при температуре воздуха 589 К индекс эмиссии увеличивается от 3 при $\alpha \approx 3,8$ до максимального значения $\sim 6,5$ при $\alpha \approx 1,41$ и затем уменьшается до $\sim 4,6$ при $\alpha \approx 0,98$. Как отмечалось, изменение формы кривой образования NO_x характеризует влияние многих факторов, таких как скорости реакции, наличие свободного кислорода и температура в зоне реакции. Визуальные наблюдения и анализ данных о процессе горения позволили сформулировать упрощенную мо-

дель образования NO_x в камере с вихревыми модулями.

При горении бедных смесей реакция происходит быстро и завершается на малом расстоянии от модульного фронтального устройства, так как основная часть принимающего участие в горении воздуха проходит через модули. Зона горения ограничена областью циркуляционного следа за модулями. Воздух, проходящий через решетку модулей, циркулирует в следе за ними, перемешивается с продуктами сгорания, в результате уменьшается температура пламени и скорость образования NO_x . По мере обогащения смеси тепловыделение увеличивается, и фронт пламени уже не ограничивается областью следа за модулями, а распространяется на все фронтальное устройство. При этом в локальных зонах реакции развиваются максимальные температуры, и скорость образования NO_x увеличивается. Дальнейшее обогащение смеси обуславливает появление дополнительных эффектов, которые уменьшают скорость образования NO_x .

При горении богатой смеси расходуются больше кислорода, а это означает, что в образовании NO_x участвует меньше кислорода. Кроме того, добавление топлива приводит к чрезмерному обогащению зоны вблизи модулей. При этом, как показано в гл. II, § 3, температура в зоне горения и скорость образования NO_x должны уменьшаться.

Снижение интенсивности горения в зоне реакции сопровождается приближением этой зоны к выходу из камеры. Таким образом, путь, по которому горячие газы проходят через камеру, и время пребывания уменьшаются. Подобные условия в камере имеют место при $\alpha = 1,41—1,02$. В этом диапазоне температура на выходе из камеры непрерывно растет до максимального значения 2324 K , в то время как индекс NO_x падает. При значениях α меньших $1,02$ дополнительный кислород уже отсутствует и температура на выходе уменьшается.

Приведенная упрощенная модель подтверждает, что увеличение давления и температуры на входе приводит к увеличению скорости образования NO_x . С увеличением температуры до 755 и 839 K скорость образования NO_x возрастает в $3—4$ раза (рис. 27).

При увеличении средней скорости потока газа в камере образование NO_x замедляется ввиду уменьшения времени пребывания.

Влияние состава смеси и температуры на входе на образование несгоревших углеводородов и окиси углерода в вих-

ревой камере (при давлении на входе в камеру $5 \cdot 10^5$ — $6 \cdot 10^5$ Па и $5 \cdot 10^5$ — $10 \cdot 10^5$ и расходе воздуха 38,7—50 кг/с) показано соответственно на рис. 28, 29. Высокие концентрации этих загрязняющих веществ, соответствующие температуре на входе 589 К, при самых высоких α характеризуют неполноту сгорания, составляющую около 3%. Затем по мере обогащения смеси топливом концентрации этих веществ уменьшаются. При дальнейшем обогащении смеси концентрации вновь возрастают из-за недостатка кислорода. При $\alpha = 0,98$ количество несгоревших углеводородов соответствует неполноте сгорания около 1%, для СО это соответствует неполноте сгорания около 7%. Концентрации обоих веществ существенно уменьшаются с возрастанием температуры на входе в камеру.

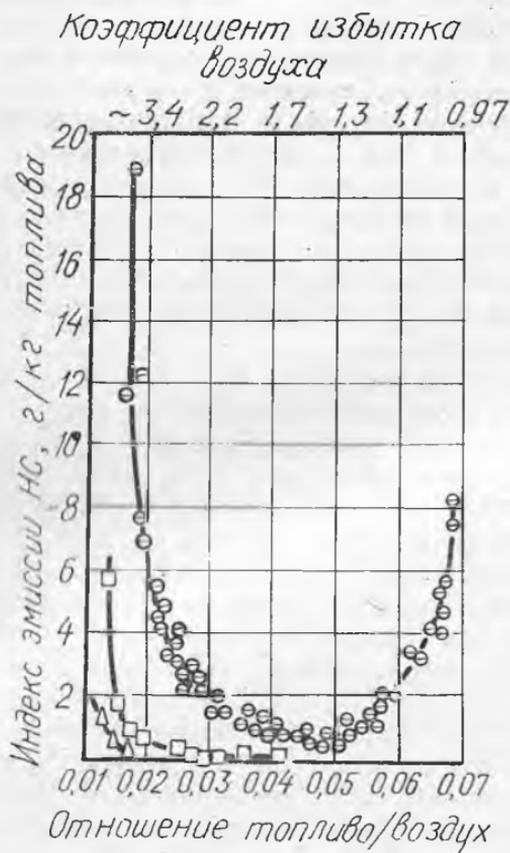


Рис. 28. Влияние температуры воздуха на входе в камеру и состава смеси на выделение несгоревших углеводородов при температуре на входе: \odot — 589; \square — 755; \triangle — 839 К

С увеличением скорости потока концентрации НС и СО увеличиваются (в противоположность аналогичной зависимости для NO_x). Следовательно, такие способы уменьшения времени пребывания, как сокращение длины камеры и обеспечение быстрого перемешивания с точки зрения уменьшения выбросов NO_x наиболее предпочтительны.

Весьма важным для модульной камеры является выбор числа горелок, одновременно работающих на малом газе, когда борьба с выбросами особенно необходима. На режиме малого газа камера испытывалась при подаче топлива во все

модульные горелки, а также при подаче всего расхода топлива раздельно в каждый из трех рядов.

Результаты измерения полноты сгорания топлива приведены при температуре воздуха на входе 478 К, давлении на входе $4 \cdot 10^5$ Па (~ 4 кг/см²) и характерной скорости 26 м/с (рис. 30). Когда топливо подавалось во все горелки, полнота сгорания была низкой, а срыв пламени происходил при общем для камеры сгорания $\alpha \approx 7,5$. Подача всего топлива толь-

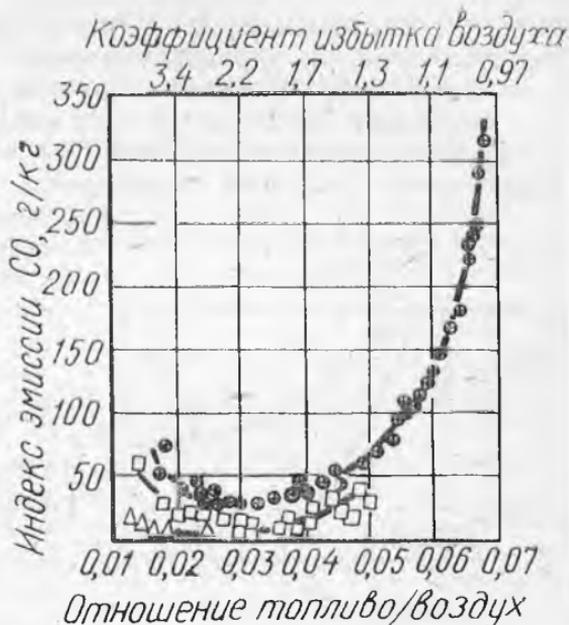


Рис. 29. Влияние температуры воздуха на входе в камеру и состава смеси на образование окиси углерода при температуре на входе: \oplus — 589; \square — 755; \triangle — 839 К

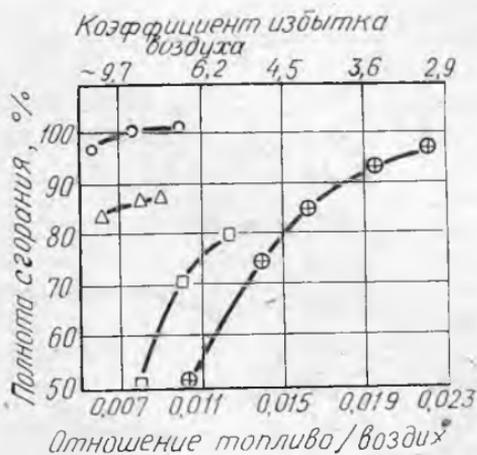


Рис. 30. Полнота сгорания на режиме малого газа: \circ — внутренний ряд модулей; \oplus — все модули; \triangle — наружный ряд модулей; \square — средний ряд модулей

ко в средний ряд горелок несколько увеличила полноту сгорания, которая при $\alpha \approx 8,5$ достигла 50%. Подача всего топлива из наружный ряд горелок привела к существенному повышению полноты сгорания. Когда же топливо подавалось во внутренний ряд горелок, полнота сгорания составила почти 100%.

Эффективность подачи топлива через внутреннее кольцо модульных горелок была наибольшей, так как этот ряд имел наименьшее количество го-

релок, и, следовательно, при данном составе смеси в каждую горелку подавалось пропорционально большее количество топлива. Причина неудовлетворительной работы среднего ряда, возможно, заключается в охлаждении газа, происходящем из-за уменьшенной степени загромождения сечения стабилизаторами пламени этого ряда модульных горелок.

Уменьшенная степень загромождения является также причиной пропорционального увеличения расхода воздуха, идущего через среднюю часть фронтного устройства.

Кривые, характеризующие процесс образования несгоревших углеводородов и окиси углерода при давлении на входе $4 \cdot 10^5$ Па и характерной скорости 26 м/с, показаны соответственно на рис. 31, 32. Как следует из рисунков, концентрации загрязняющих веществ из-

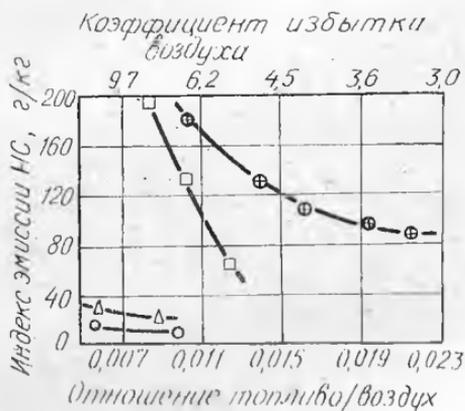


Рис. 31. Выделение несгоревших углеводородов на режиме малого газа (обозначения см. на рис. 30)

меняются противоположно полноте сгорания. Дополнительные признаки охлаждения газов в среднем ряду модульных горелок видны на рис. 32, где показано, что уровень выхода окиси углерода для среднего ряда горелок выше, чем при подаче топлива во все модульные горелки. Наименьшие значения выбросов получены при подаче топлива только во внутренний ряд модульных горелок. При $\alpha = 8,5$ показатель HC равен ~ 10 , а CO — около 40. Показатель NO_x был наибольшим, но не превышал 1.

Из приведенных данных следует, что уровень выбросов

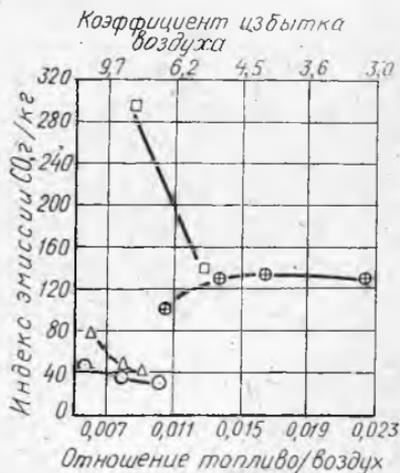


Рис. 32. Выделение окиси углерода на режиме малого газа (обозначения см. на рис. 30)

рассмотренной камеры сгорания значительно ниже, чем камеры обычной конструкции. Обусловлено это меньшим временем пребывания из-за малой длины камеры, быстрым перемешиванием продуктов сгорания со смесительным воздухом и равномерным распределением топлива по фронтальному устройству благодаря применению вихревых модулей. Возможность радиального перераспределения топлива обеспечивает высокую полноту сгорания и низкий уровень выбросов загрязняющих веществ также и на режиме малого газа.

§ 3. ПРИМЕНЕНИЕ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ВИХРЕВЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ФОРСУНОК

В камерах сгорания с форсунками механического распыления низкие давления подачи жидкого топлива на режиме малого газа приводят к ухудшению процессов распыления и подготовки смеси. Как следствие этого увеличиваются выбросы СО и НС.

Наиболее простым и в то же время весьма эффективным способом улучшения горения является применение пневматического распыла. Для этого на режиме малого газа во второй контур двухсопловой форсунки подается сжатый воздух. Испытания эффективности этого способа на камере ИТ8Д показали (рис. 33), что при расходе 0,00318 кг/с вспомогательного воздуха, что составляет ~0,25% всего расхода воздуха, выбросы СО уменьшились в 3,5 раза, а выбро-

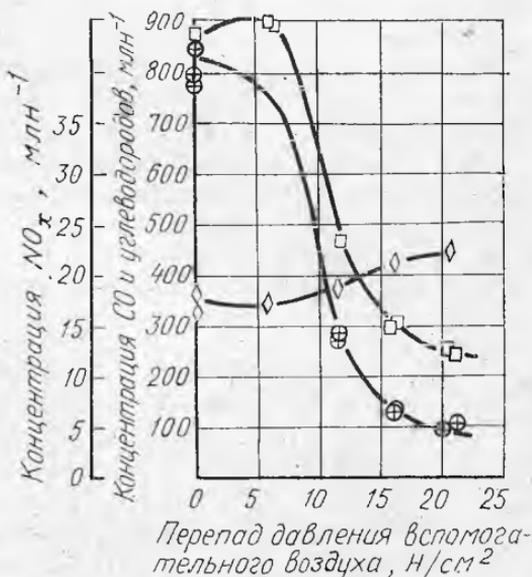


Рис. 33. Характеристики выбросов из камеры с пневматическими форсунками на режиме малого газа (двигатель ИТ8Д); при $P_3 = 24,1$ н/см²; $T_3 = 380$ К; $G_B = 1,36$ кг/с; $\alpha \approx 6$; \ominus — НС; \square — СО; \diamond — NO_x

сы углеводородов в 8 раз. Как и предполагалось, выбросы NO_x несколько увеличились из-за увеличения температуры пламени при большей полноте сгорания.

Применение вихревых акустических форсунок [4, 26] при сжигании природного газа в двигателе НК-12СТ дало возможность повысить полноту сгорания и снизить образование NO_2 при некотором увеличении CO . На рис. 34 показаны результаты испытаний полноразмерного двигателя. Приведенные данные указывают на очень низкий выход окислов азота при работе двигателя на природном газе и на заметно повышенный выход CO и CH_4 . Причиной этого является низкая температура горения ввиду сильного обеднения смеси.

Пневматические форсунки находят все большее применение в авиационных двигателях. Пожалуй, единственным их недостатком является усложнение системы подачи топлива и отсутствие на борту сжатого воздуха повышенного давления. Это несущественное препятствие при использовании пневматического распыла в форсажных камерах сгорания, когда необходимый для форсунок сжатый воздух может отбираться непосредственно от компрессора двигателя. Для основных камер сгорания разрабатываются схемы, так называемых, низконапорных вихревых распылителей, работающих от скоростного напора набегающего потока воздуха. В частности, рассмотренные в гл. II (§ 1, 2) вихревые модули представляют собой один из вариантов пневматического распылителя низкого напора. Соответствующая оптимизация конструкции вихревой форсунки с целью получения акустических колебаний [4, 5] открывает возможности дальнейшего совершенствования их характеристик по распылению и смешению.

§ 4. РЕГУЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, ЗОННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОПЛИВА И ПЕРЕПУСК ВОЗДУХА ИЗ КОМПРЕССОРА В АТМОСФЕРУ

На режимах малой мощности из-за низкой температуры воздуха на входе в камеру сгорания, переобеднения смеси и неудовлетворительного распыления и смешения топлива уменьшается полнота сгорания и увеличивается образование CO и HC .

Перепуск воздуха в атмосферу позволяет уменьшить коэффициент избытка воздуха без соответствующего повыше-

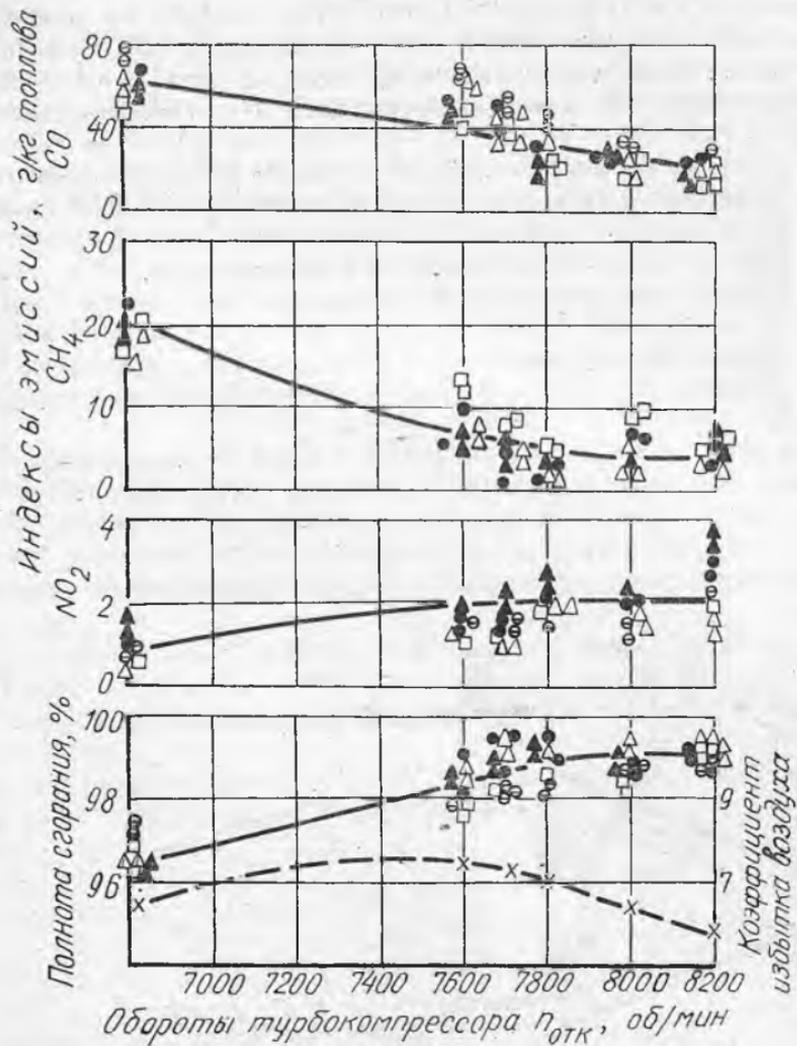


Рис. 34. Зависимость полноты сгорания, выхода токсичных соединений и коэффициента избытка воздуха от оборотов двигателя НК-12СТ: \emptyset , Δ , \square —вихревая (акустическая) форсунка, соответственно 1, 2 и 3 день испытаний; \bullet , \blacktriangle —струйные форсунки, соответственно 1 и 2 день испытаний; \times —средненные значения α двигателя

ния тяги двигателя на малом газе. Влияние эффективности перепуска воздуха определялось, например, при испытаниях двигателя ИТЗС-7 фирмы Пратт-Уитни (США) на режимах малого газа при неизменной тяге. Оказалось, что с увеличением количества перепускаемого воздуха до 11% от общего расхода через двигатель концентрация НС уменьшалась на 40%.

Изменение геометрии камеры и зонное распределение топлива позволяет уменьшить местное значение α и тем самым повысить полноту сгорания. В камере с переменной геометрией это достигается изменением ее аэродинамики так, чтобы в первичной зоне можно было поддерживать оптимальную величину α . Зонная подача топлива (как это показано в двух предыдущих параграфах) дает возможность создавать локальные области с благоприятным составом смеси, повышать полноту сгорания и снижать уровень эмиссий.

Влияние переменной геометрии и зонного распределения топлива на выбросы СО, НС и полноту сгорания подробно изучалось на камере сгорания, схематически представленной на рис. 35. Двухъярусная кольцевая камера сгорания имеет два регулируемых проходных сечения: фронтальной воздухоза-

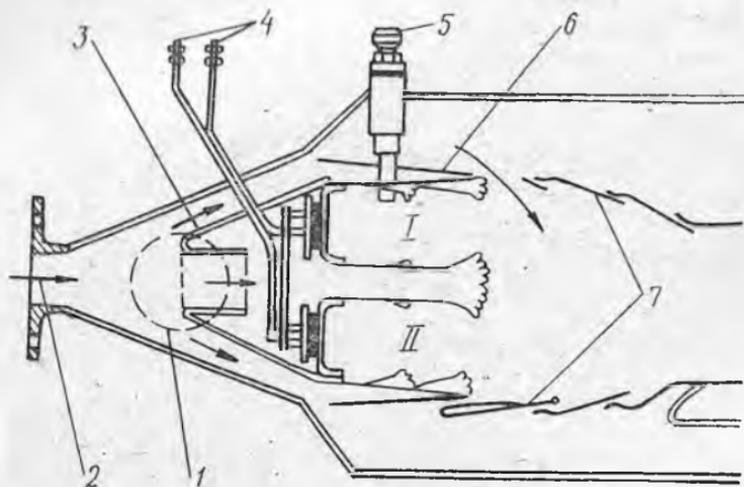


Рис. 35. Схема регулируемой двухъярусной кольцевой камеры сгорания: I — регулируемое сечение воздухозаборника; 2 — поток воздуха; 3 — воздухозаборник; 4 — подача топлива; 5 — свеча зажигания; 6 — открытая (регулируемая) стенка жаровой трубы; 7 — стенки газосборника; I, II — наружная и внутренняя кольцевые полости

борник 1, прикрепленный к лобовой плите жаровой трубы, и часть наружной стенки жаровой трубы 6. Площадь воздухозаборника изменялась установкой на нем перфорированных пластин с отверстиями различного диаметра. Таким путем регулировалось количество воздуха, подаваемого через завихрители в первичную зону камеры. С целью поддержания на приемлемом уровне потерь давления и обеспечения необходимого распределения воздуха раскрывалась часть стенки жаровой трубы. Через раскрытую щель в жаровую трубу поступал воздух помимо воздухозаборника.

Результаты испытаний этой камеры показали, что перераспределением воздуха можно в два раза и более уменьшить выход СО и НС.

Двухъярусная кольцевая конструкция камеры позволила также исследовать различные режимы зонной подачи топлива: *a* — нормальную — подачу топлива в обе кольцевые полости; *b* — подачу только в одну из полостей; *в* — комбинированную подачу в нескольких точках по окружности камеры со смещением форсунок в наружном и внутреннем кольцах в шахматном порядке. Наилучшие результаты показал режим с подачей топлива только во внутреннее кольцевое пространство. При $\alpha = 9,7$ уровень эмиссии НС был в пять раз меньше, чем при обычном распределении топлива. При комбинированной подаче он снизился незначительно из-за сильного понижения температуры горения вследствие очень большого расстояния между форсунками. Каждое ядро горения оказалось окруженным преждевременно охлажденными и непрореагировавшими газами.

Влияние зонной подачи топлива на выбросы СО было совершенно другим, при $\alpha = 9,7$, в случае подачи топлива всеми форсунками, эмиссия СО была наименьшей; при уменьшении α уровень эмиссии повысился до максимального при величине $\alpha = 6,8$, после чего снова уменьшился. Подача топлива только во внутренний контур показала наилучшие результаты в широком диапазоне α .

Анализ зависимости полноты сгорания от состава смеси показывает, что при нормальной подаче топлива и $\alpha = 9,7$ полнота сгорания настолько низка (35%), что основная масса топлива не сгорает и СО образуется мало. С уменьшением α полнота сгорания повышается и количество СО увеличивается. При дальнейшем уменьшении α количество СО, окислившейся в СО₂, увеличивается, а эмиссия СО вновь умень-

шается. Применение зонной подачи топлива позволяет повысить полноту сгорания при высоких α .

Таким образом, зонная подача топлива посредством изменения условий теплообмена в области горения позволяет значительно снизить НС и в меньшей степени СО на режимах малого газа.

§ 5. КАТАЛИТИЧЕСКАЯ КАМЕРА СГОРАНИЯ

Рабочий процесс в каталитической камере сгорания [27] отличается тем, что химическая реакция высвобождения энергии топлива инициируется главным образом гетерогенным катализатором (каталитической поверхностью). При этом эффективность горения определяется в первую очередь величиной активированной поверхности, приходящейся на единицу объема камеры. Исходя из требования обеспечения максимальной активированной поверхности при заданном уровне гидравлических потерь каталитическая камера сгорания конструктивно выполняется в виде монолитного корпуса, заполненного керамическими сотами.

Сотовая камера действует как пучок трубчатых реакторов, в которых энергия высвобождается по мере продвижения смеси вдоль трубки. Следовательно, температура в таком реакторе повышается монотонно, достигая максимума в конце. Массоперенос между трубками отсутствует, и тепло передается лишь путем конвекции. Основное количество энергии выделяется внутри каждого трубчатого реактора в результате горения. Поэтому в первом приближении можно считать, что процесс в каждом реакторе развивается независимо. Поскольку реакторы идентичны как по форме, так и по рабочему процессу, энергия распределяется в каждом поперечном сечении камеры равномерно. Это значит: если распределение температуры, состава смеси и скорости потока на входе в камеру равномерно по ее сечению, то на выходе эти параметры будут распределены также равномерно. Следовательно, и любая неравномерность параметров потока на входе может быть определена по неравномерности на выходе.

В каталитической камере протекает несколько процессов. Реагенты диффундируют к катализатору и адсорбируются. Происходят поверхностные химические реакции, сопровождаемые выделением и диффузией продуктов в основной поток. Одновременно идут гомогенные реакции в газовой фазе.

На рис. 36 дана схема распределения зон указанных процессов в трубке реактора. На входе температура газа слишком низка для возникновения реакций в газовой фазе, здесь преобладают химические реакции на поверхности. По мере продвижения газа по трубе и возрастания температуры скорость гетерогенных реакций увеличивается до такой степени, что на какой-то длине трубы определяющим фактором скорости реакций становится диффузионный массоперенос. В конце реактора температура возрастает приблизительно до $\sim 1260\text{ K}$, и преобладающими становятся реакции в газовой фазе. В большинстве случаев переход от зоны реакций на поверхности до зоны диффузионного массопереноса осуществляется на длине одного диаметра трубы. Поскольку в конце камеры сгорания температура авиационных ГТД может достигать 1640 K и преобладающими являются реакции в газовой фазе, наносить катализатор на поверхность выходной части камеры не требуется.

Устройство каталитической камеры сгорания включает в себя три основных элемента: катализатор, ложе для катализатора и систему смесеобразования.

Катализатор играет важную роль в химических процессах, поэтому его следует рассматривать как самостоятельный элемент. Исторически сложилось так, что катализаторы применялись лишь в химической технологии синтеза, дегидрации, реформинга, изомеризации и т. п. Катализаторы для окисления углеводородных топлив в газотурбинных камерах сгорания только начинают применяться. Рассмотрим основные виды катализаторов, применение которых перспективно для ГТД.

Ложе представляет собой сложную конструкцию, в которой катализатор вблизи входа имеет низкую рабочую температуру, а вблизи выхода — высокую.

Ложе изготавливается в виде сот или керамических сплавов с высоким содержанием никеля. При выборе материала необходимо учитывать ряд факторов: площадь поверхности,

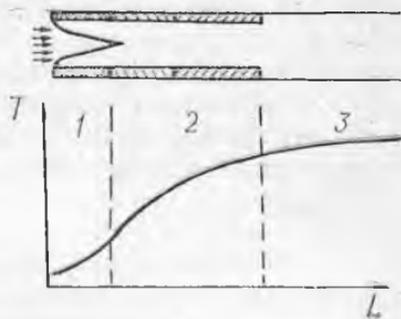


Рис. 36. Типичное распределение зон в трубчатом реакторе: 1 — зона поверхностных реакций; 2 — зона массопереноса; 3 — зона реакций в газовой фазе

пористость, инертность, стабильность, прочность, коэффициент термического расширения и др. Первые два фактора важны для получения максимальной суммарной активной площади. Для обеспечения надежного сцепления при воздействии тепловых ударов важное значение имеет правильный подбор коэффициентов термического расширения. Материал ложа не должен взаимодействовать с катализатором и испытывать фазовые превращения в рабочем диапазоне температур.

Благородные металлы (платина) имеют наименьшую рабочую температуру, но не выдерживают высоких температур на выходе из камеры. Эти металлы дороги. Проблема снижения стоимости может быть решена повторным использованием камер сгорания. Учитывая, что стоимость обычной камеры относительно мала по сравнению со стоимостью всего двигателя, применение катализатора благодаря преимуществам в характеристиках (более низкий расход топлива) может дать положительный эффект с точки зрения оптимального соотношения стоимость — эффективность.

Оксиды хрома и кобальта считаются хорошими катализаторами при температуре выше 640 К. Они нашли применение при изготовлении активированных поверхностей основных и форсажных камер сгорания.

Оксиды редкоземельных элементов, например, лантана или цезия, имеют хорошие характеристики в более высоком диапазоне температур (выше 1090 К). Их применение целесообразно в форсажном контуре двигателя.

Изменение химической активности этих трех групп катализаторов в зависимости от температуры является критерием при выборе конструкции ложа катализатора.

Наилучшими материалами являются кордиерит и карбид кремния. Кордиерит — это алюмомагнетитовая керамика, широко применяемая для автомобильных каталитических дожигателей. Он термически стабилен и обладает высоким сопротивлением удару. Из этого материала обычно методом выдавливания получают структуры с сотами круглого, шестиугольного, квадратного, прямоугольного или треугольного сечений. Типичная плотность распределения сот — 40 ячеек на 1 см², что соответствует площади 23 см² на 1 см³ объема. Так же можно получить плотность 64 ячеек на 1 см². Однако кордиерит не выдерживает очень высоких температур, обычно возникающих в камерах сгорания. Для него макси-

мально допустимая температура при длительном воздействии составляет около 1470 К.

Высокопрочным огнеупорным материалом является карбид кремния. Он используется для изготовления турбинных лопаток. Карбид кремния обладает также высоким сопротивлением тепловым ударам и высокой жаропрочностью, но стоит он примерно в 5 раз дороже керамических материалов. Изменение термических свойств этих двух материалов отвечает требованиям слоистой конструкции ложа катализатора.

Система смесеобразования предназначена для предварительной подготовки (испарения и смешения) топливо-воздушной смеси перед подачей в камеру сгорания. Рекомендуется в готовой смеси иметь 5—10% топлива в жидкой фазе. Система смесеобразования должна обеспечивать равномерное поле температур, скоростей и концентраций компонентов. По предъявленным требованиям она мало чем отличается от рассмотренных в §1—3 систем смесеобразования для модульных и вихревых камер сгорания.

Основные каталитические камеры сгорания

Применение катализаторов в основных камерах сгорания показало очевидные преимущества их по сравнению с камерами обычного типа. По соображениям прочности турбины температура на выходе из камеры сгорания не должна превышать ~ 1640 К. Стехиометрический состав смеси соответствует температуре выше 2470 К. Следовательно, из-за ограничений по температуре камера сгорания должна работать на очень бедных смесях, при $\alpha \geq 2,5$, но такой состав смеси для углеводородных топлив находится за пределами воспламенения и горения. В обычных трехзонных камерах проблема воспламенения решается сжиганием смеси при различных α в каждой зоне (см. гл. 1, § 1). Горение в первичной зоне происходит при $\alpha \approx 1,0$, что приводит к повышению температуры газа до 2470 К и более. В таких условиях окислов азота образуется в 100 раз больше, чем при температуре 1640 К. Характерное распределение температуры по длине обычной камеры сгорания показано на рис. 37а. Неравномерное выделение тепла приводит к флуктуациям во времени температуры, скорости и концентрации компонентов в любой точке потока, что отрицательно сказывается на работе лопаток турбины. По соображениям надежности работы тур-

бины среднемассовую температуру газов несколько снижают, увеличивая тем самым удельный расход топлива.

Для камер со ступенчатым подводом тепла (например, «Vorbiх») характерно более равномерное распределение температуры по длине (рис. 37 б), работать они могут на обедненных смесях. Однако при определенных достоинствах, в смысле уменьшения токсичных соединений, такие камеры имеют весьма сложную конструкцию.



Рис. 37. Изменение температуры по длине камеры: а — обычная камера; б — камера со ступенчатым подводом тепла; в — каталитическая камера

Применение катализаторов позволяет получить ряд новых положительных свойств по сравнению с обычным процессом горения.

1. Выделение энергии в трубчатом реакторе происходит непрерывно при медленном увеличении температуры продуктов сгорания (рис. 37, в), благодаря чему поля температур, скоростей и концентраций компонентов имеют минимальную неравномерность по выходному сечению и во времени. Появляется возможность равномерного профилирования поля температур по высоте лопатки. Каталитическая камера позволяет повысить среднемассовую температуру потока на входе в турбину, а следовательно, получить более низкий удельный расход топлива и более высокую удельную тягу.

2. Повышение стабильности рабочего процесса объясняется двумя причинами: во-первых, присущая катализатору высокая химическая активность обеспечивает высокий коэффициент полноты сгорания в широком диапазоне α и устой-

чивость по срыву пламени, переход от обычного механизма окисления к каталитическому увеличивает скорость реакции в 10^4 — 10^7 раз; во-вторых, благодаря наличию ложа катализатора, увеличение тепловой инерции зоны горения уменьшает возможность нежелательного воздействия изменения расхода топлива или воздуха на рабочий процесс. Расчеты в первом приближении показывают, что способность аккумулировать тепло у каталитической камеры в 400 раз больше, чем у обычной, поэтому в ней сглаживаются значительные колебания температуры.

3. Максимальная температура в камере на выходе соответствует $\alpha = 2,5$. Излучение тепла при температуре 1640 К в 5 раз меньше, чем при 2470 К, поэтому элементы конструкции, в частности лопатки турбины, будут работать в более легких условиях.

4. Наличие гомогенной топливо-воздушной смеси уменьшает выделение твердого углерода, что снижает излучение, светимость пламени, а следовательно, и вероятность обнаружения самолета.

5. Устойчивое горение при низких α (доказана возможность горения при $\alpha = 10$) позволяет снизить до минимума образование окислов азота в продуктах сгорания. В то же время полнота сгорания, как показано в работе [27], даже при $\alpha = 3,4$ достигает 100%. Суммарные потери давления на катализаторе и системе смесеобразования составляют 8—9% (приблизительно как в обычных камерах).

Каталитические форсажные камеры

Каталитические материалы могут применяться в форсажных камерах для воспламенения и стабилизации пламени. Каталитические воспламенители применяются в форсажных камерах двигателя УИ-93. Проблема воспламенения при пониженном давлении на большой высоте решается соответствующим выбором положения воспламенителя вниз по потоку за форсункой. Смеси, близкие к стехиометрическому составу, легко воспламеняются с выделением большого количества тепла, что гарантирует надежность работы камеры на большой высоте.

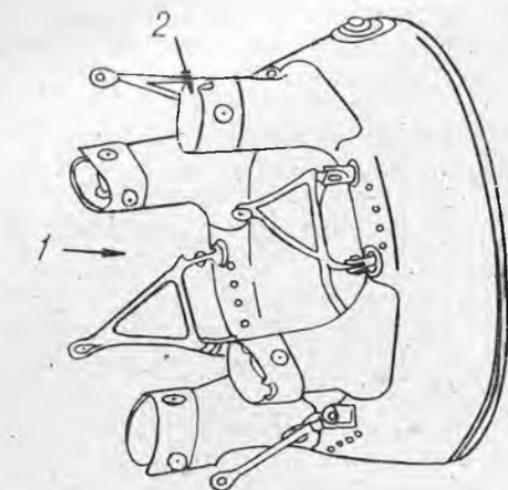
Обычно коэффициент полноты сгорания η_r в форсажных камерах составляет 85—95%, в то время как в основных камерах он достигает 99%. Это объясняется большой скоростью

потока ($v \approx 250$ м/с), что при длине существующих камер соответствует малому времени пребывания в ней продуктов сгорания. Повышение полноты сгорания позволило бы или достичь более высоких характеристик двигателя, или уменьшить его длину. Применительно к двигателю I 85 при $M_n = 0,5$ увеличение η с 85 до 95% повысило бы тягу и соответственно снизило удельный расход топлива на 3%. При $\eta_r = 90\%$ применение катализаторов позволило бы снизить длину форсажной камеры на 23%.

Использование хонейкомба в качестве каталитического стабилизатора позволяет получить более устойчивые характеристики форсажной камеры по срыву пламени. Такой стабилизатор не вызывает увеличение сопротивления, поскольку поток, проходящий через него, турбулизируется незначительно.

Есть несколько методов использования катализатора в форсажных камерах сгорания. Первый из них состоит в том, что используется стандартный стабилизатор (двигатель I 85) с рубашкой из каталитического материала. При этом возникает проблема создания прочной и надежной связи между катализатором и материалом стабилизатора.

На двигателе I 85 был установлен V-образный стабилизатор из листового материала.



тор из листового материала. На рис. 38 представлен его общий вид. Через входные каналы, расположенные с четырех сторон кольцевого стабилизатора, рабочая смесь заданного состава поступает во внутреннюю полость стабилизатора. Обе поверхности стабилизатора покрыты слоем катализатора. Запальная свеча установлена во внутренней полости. При таком использовании каталитических покрытий возникает опасность того, что влияние катализатора распространяется только на погра-

Рис. 38. Стабилизатор форсажной камеры двигателя I 85: 1 — поток воздуха; 2 — направляющие камеры с горелками

ничный слой над каталитической поверхностью и не достигает основного потока.

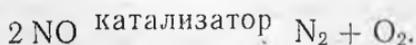
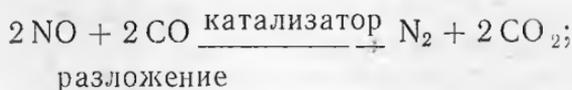
Другим вариантом стабилизирующего устройства является так называемый кольцевой хонейкомб из керамического материала, покрытого катализатором. В таком устройстве потери полного давления меньше, чем в обычном стабилизаторе, имеющем такую же площадь загромождения канала. Это устройство можно назвать «стабилизатором поверхностного горения». С его помощью можно получить максимальную полноту сгорания на минимальной длине. Состав смеси в этом случае обеспечивается набором форсунок, связанных со стабилизатором пламени.

Таким образом, сам принцип организации рабочего процесса в каталитической камере сгорания (высокие скорости химических реакций, низкая температура, высокая устойчивость пламени и др.) исключает возможность образования токсичных соединений и позволяет достичь 100% полноты сгорания топлива при умеренном повышении гидравлического сопротивления. Преодоление технических трудностей при использовании катализаторов позволит создать практически идеальную камеру сгорания для газотурбинного двигателя.

§ 6. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИСАДОК К ТОПЛИВУ

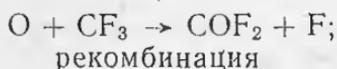
По вопросу применения присадок к топливу с целью снижения выбросов NO_x наиболее полный обзор представлен в статье Н. Шоу [17]. В этой же статье приведены данные о результатах исследования около 70 вариантов модификаций топлива IetA в камере сгорания ГТД. С целью получения общей оценки способов уменьшения выбросов присадки были подразделены на 7 следующих групп:

1. Растворимые присадки (например, Co, Na, Fe, Ni, Sb и др.), которые являются гетерогенными катализаторами: восстановление



2. Присадки, которые поглощают или рекомбинируют

атомы кислорода (например, CCl_4 (CF_3)₂ CNOH):
поглощение



3. Присадки, снижающие максимальные температуры:

а — путем теплоотдачи излучением твердых частиц (например, дихлорпентадиен дает сажу, органометаллы дают окислы);

б — путем эндотермических физических превращений (примером могут служить эмульсии воды, спирта, муравьинокислого аммония, нитрата аммония, ацетата гидразина).

4. Присадки, которые замедляют воспламенение и, следовательно, сокращают время пребывания при максимальных температурах (например, анилин, диэтиловый эфир).

5. Присадки, изменяющие гидродинамику распыла (например, полиизобутилен, растворенные полимеры).

6. Присадки, разрушающие NO (например, анилин, муравьинокислый аммоний, ацетат гидразина):



7. Сочетание указанных присадок для синергического воздействия [например, $\text{Sb} + \text{CCl}_4$; $0,7 \text{ Ni} + 0,3 \text{ Cu}$ (монель)].

В общей сложности было испытано около 70 присадок.

Среди них 12 нефтенатов металлов, 6 ацетилацетонатов металлов, 5 солей металлов неокислот, 6 смешанных соединений металлов, 4 суспензии карбонатов щелочных и щелочноземельных металлов, 17 присадок, не содержащих металлы, и 21 эмульсия.

Из перечисленных семи групп присадок эффективной оказалась только первая. Результаты по снижению окислов азота, полученные с переходными металлами, представлены на рис. 39. Для четырех наиболее эффективных металлов исследовалось влияние количества добавляемого металла. Добавки кобальта и меди в количестве 0,2—0,3% по весу уменьшают выход NO_x на 28 и 16% соответственно.

Прирост эффективности почти для всех металлов уменьшался в области больших добавляемых количеств. Другие органометаллические соединения, содержащие кальций, церий, свинец, алюминий, цирконий, литий и сурьму, при добавлении 0,1 вес % металла уменьшают количество NO_x незначительно.

Было испытано четыре суспензии карбонатов металлов при добавлении их в количестве 0,1 вес %. Карбонат натрия уменьшал выброс NO_x примерно на 20%, карбонат лития — на 10%. Карбонаты бария и кальция оказались неэффективными.

Собственно металлы и (или) их окислы, которые являются активными в процессе конверсии NO , нерастворимы в топливе для реактивных двигателей.

Органометаллические соединения добавлялись к топливу как растворимые компоненты, а для нерастворимых использовались органические вещества, переводящие их в растворимое состояние. Предполагалось, что в момент поступления в зону сгорания эти соединения образуют сильно диспергированный катализатор. И действительно, в ряде опытов с соединениями железа на жаровой трубе камеры сгорания был обнаружен красно-бурый порошок, который был по-видимому окислом железа. Другие металлы также оставляли на жаровой трубе следы своих окислов.

При вводе содержащих металл компонентов в камеру сгорания ГТД могут возникнуть серьезные проблемы: образуются отложения, которые приводят к возникновению местного перегрева и, как следствие, — к эрозии и коррозии жаровой трубы и лопаток турбины. Кроме того, известно, что органометаллические соединения ускоряют образование осадка в авиационных топливах. Осадок может забить узкие каналы и загрязнить теплопередающие поверхности, что делает самолет непригодным к эксплуатации. Эти неблагоприятные факторы не принимались во внимание при выборе модификаций топлива, чтобы не упустить при рассмотрении перспективных присадок.

Механизм и кинетика образования NO в пламенах чрезвычайно чувствительны к изменению времени — температуры

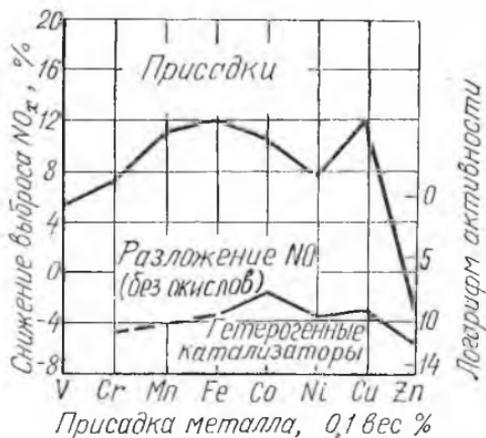


Рис. 39. Результаты по снижению окислов азота путем присадки металлов к топливу

процесса горения и к концентрации кислорода в пламени. Следовательно, присадки к топливу или изменение состава, способные воздействовать на указанные факторы, могут заметно влиять на выбросы NO из реактивных двигателей. При прочих равных условиях уменьшение концентрации атомарного кислорода снижает скорость образования NO и, значит, его выбросы. Снижения количества свободного атомарного кислорода можно достичь с помощью веществ, способных вступать в реакцию с атомами кислорода или быть катализаторами для их рекомбинации. Известные вещества, обладающие такими свойствами, были испытаны и использованы с целью ингибирования пламени. Испытывались четыреххлористый углерод и перфторпропиловый спирт при добавке 2,5 об. %, но оба они оказались неэффективными для снижения выброса NO_x .

Карбонаты металлов действуют путем образования перексидов металлов с помощью реакции, в которой участвует атомарный кислород. Из четырех испытанных суспензий карбонатов эффективными оказались только карбонаты щелочных металлов: карбонат натрия снижал выброс на 20%, а карбонат лития - на 10%.

Другим способом уменьшения NO_x является использование присадок, понижающих температуру горения. Даже небольшое изменение максимальных температур может существенно повлиять на образование NO . Наибольший эффект может дать снижение температуры в первичной зоне горения, где образуется основная доля NO .

Максимальные температуры горения могут быть уменьшены с увеличением теплоотдачи излучения в первичной зоне. Любые частицы, содержащиеся в пламени, в том числе сажа, увеличивают лучистую теплоотдачу факела. Повышение содержания CO_2 в газах увеличивает их теплоотдачу излучением. Эта группа не дала результатов, так как некоторые металлоорганические вещества эффективно снижали уровень NO_x , а другие нет. Объяснить какое-либо существенное снижение уровня NO_x лучистой теплоотдачей невозможно.

Другим способом снижения максимальных температур горения в реактивном двигателе может служить добавка к топливу веществ, способных претерпевать эндотермические физические или химические превращения в пределах первичной зоны камеры. Подразумевается, что тепло, поглощенное эндотермическими реакциями в первичной зоне, отдается в

процессе полного сгорания в более холодной вторичной зоне и КПД сгорания не уменьшается.

В качестве главной присадки, претерпевающей физическое эндотермическое превращение, обычно рассматривается вода. Так как при испарении воды поглощается примерно 556 ккал/кг по сравнению с теплотой сгорания топлива — 10200 ккал/кг, добавка воды к топливу вызывает только небольшое изменение максимальной температуры. Но даже небольшое изменение максимальной температуры в реактивном двигателе может оказаться достаточным для существенного изменения выбросов NO_x . Эксперименты показывают, что влияние воды зависит от ее массы по отношению к массе воздуха, и при отношении воды к воздуху меньшем 0,01 эффект сравнительно невелик.

Аналогичные данные получены в КуАИ при испытании отсека камеры сгорания. Впрыском воды в количестве 50—100% от расхода топлива можно на 20—50% снизить выбросы NO_x . Такого же эффекта по снижению NO_x можно достичь и при меньшем (в 10 раз) расходе воды, если ее впрыскивать в виде однородной эмульсии с топливом. Для получения водно-топливной эмульсии в КуАИ был разработан специальный гидродинамический вихревой ультразвуковой эмульгатор.

Одним из наиболее важных параметров, определяющих уровень выбросов NO_x , является время пребывания компонентов при максимальных температурах. Лучшим способом уменьшения времени пребывания является замедление воспламенения. Некоторые антидетонаторы, используемые для бензина, были испытаны как замедлители воспламенения газотурбинного топлива. Были испытаны металлоорганические соединения: тетраэтил и тетраметил свинца, анилин, некоторые кетоны и эфиры. Однако оказалось, что ни одна из этих присадок для реактивных топлив не является эффективным замедлителем воспламенения.

В заключение следует отметить, что наиболее эффективные модификации топлива позволяют снизить уровень NO_x на ~30%. Поскольку эти модификации связаны с использованием металлов, которые сами могут быть загрязнителями, один тип загрязнения сменяется другим. Кроме того, достигаемый уровень уменьшения выброса NO_x не оправдывает дополнительную стоимость топлива. Присадки можно использовать для снижения выброса NO_x во время взлета самолета, так как на этом режиме выделение дыма и NO_x максимально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория воздушно-реактивных двигателей. Под ред. С. М. Шляхтенко. М., Машиностроение, 1975.
2. Уэйд В., Шен П., Оуэнс С., Маклин А. Камера сгорания автомобильного ГТД с низким уровнем выбросов. Ч. 1. Теоретический анализ и расчет камеры сгорания. Труды ASME сер. А, 1974, № 1, с. 35—55.
3. Дитякин Ю. Ф., Ягодкин В. И. Исследование форсунок с газоструйными акустическими пьезоэлементами. М., Труды ЦИАМ, № 585, 1973.
4. Кныш Ю. А., Лукачев С. В. О применении вихревых акустических форсунок в авиационных ГТД. Сб. трудов КуАИ, вып. 67, 1974, с. 211—213.
5. Белоусов А. П., Кныш Ю. А., Лукачев С. В. Акустические свойства вихревых пневматических форсунок. Известия вузов «Авиационная техника», 1977, № 1, с. 17—23.
6. Кныш Ю. А., Лукачев С. В. Экспериментальное исследование вихревого генератора звука. — «Акустический журнал», т. XXI, 1977, № 5. с. 776—782.
7. Талантов А. В. Горение в потоке. М., Машиностроение, 1978.
8. Соффер Р., Тейксейра Д., Старкман Е. Загрязнение атмосферы газотурбинными двигателями. Тр. ASME, сер. А, № 4, 1969, с. 76—83.
9. Смирнов Г. А. Роль авиации в загрязнении внешней среды канцерогенным углеводородом бенз(а)пиреном. Диссертация на соискание уч. степени кандидата биологических наук. М., 1970.
10. Джонс Р. Перспективные способы уменьшения выбросов авиационных двигателей. Тр. ASME, сер. В., 1974, № 4, с. 265—272.
11. Nelson A. W. Exhaust emission characteristics of aircraft gas turbine engines. Pap. ASME, 1972, NGT-75, 8 pp.
12. Шабод Ж. М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. М., «Медицина», 1973, с. 367.
13. Лукачев В. П., Кныш Ю. А., Ивлиев А. В. Разработка методики определения концентрации канцерогенных веществ бенз(а)пирена в выхлопных газах двигателей. Технический отчет 53—2, КуАИ, 1978.
14. Нормирование эмиссий двигателей воздушных судов. Циркуляр 134—AN 194 ИКАО, 1977, Монреаль, Канада.
15. Робертс Р., Форентино А. Результаты выполнения программы снижения эмиссии загрязняющих веществ в трубчато-кольцевых камерах сгорания ГТД. Новое в зарубежном авиадвигателестроении, 1978, № 1, с. 4—11.
16. Зельдович Я. Б. Окисление азота при горении и взрывах. Физхимия, т. 21, АН СССР, 1946, с. 577.
17. Робертс Р., Ацето Л. и др. Аналитическая модель образования окиси азота в камере сгорания газотурбинного двигателя. — «Ракетная техника и космонавтика», т. 10, 1972, № 6, с. 131—139.
18. Шоу Н. Уменьшение выбросов окислов азота из газотурбинной камеры сгорания в результате модификаций топлива. Труды ASME, сер. А, 1973, № 4, с. 24—32.
19. Хейвуд И., Фей А., Линден Л. Образование и рассеяние загрязняющих атмосферу продуктов выхлопа двигателей реактивных самолетов. — «Ракетная техника и космонавтика», т. 9, 1971, № 5, с. 89—101.
20. Хилл М., Фенимор С., Джонсон Р. Образование сажи и ее устранение при работе мощных ГТД. Экспресс-информация. — «Поршневые и газотурбинные двигатели», вып. 29, 1971, с. 32.

21. *Ацето Л., Коллек Р.* Концентрации окиси углерода в первичной зоне камеры сгорания ГТД. — «Ракетная техника и космонавтика», т. 12, 1974, № 4, с. 62—68.

22. *Щукин В. А.* Содержание окиси углерода в продуктах ламинарного и турбулентного горения. Сб. «Горение в потоке», вып. 2, Казанский авиационный институт, 1978, с. 7—9.

23. *Деметри И. Е.* Влияние основных конструктивных и рабочих параметров на достижение пониженного уровня выбросов из камеры сгорания ГТД. Тр. ASME, сер. «Д», 1975, № 3, с. 119—126.

24. *Марковски С., Ломан Р., Рейли Р.* Вихревая камера сгорания для газовой турбины. Тр. ASME, сер. А, 1976, № 1, с. 130—138.

25. *Белоусов А. Н., Кныш Ю. А., Липский А. М.* Особенности течения закрученного потока в канале вихревой форсунки. Известия вузов, «Авиационная техника», 1978, № 3, с. 144—148.

25. *Нидцвески Р., Джонс Р.* Измерение концентрации загрязняющих веществ, выделяемых завихрительной камерой сгорания. — «Ракетная техника и космонавтика», т. 12, 1974, № 6, с. 134—141.

26. *Ивлиев А. В., Кныш Ю. А., Лукичев В. П.* Влияние конструктивных особенностей камеры сгорания на выход токсических соединений. Известия вузов, «Авиационная техника», 1977, № 1, с. 60—65.

28. *Росфорд Т.* Каталитические камеры сгорания для газотурбинных двигателей. — «Новое в зарубежном авиадвигателестроении», 1978, № 3, с. 8—13.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Основные условные обозначения	5
Глава I. ОБРАЗОВАНИЕ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В КАМЕ- РЕ СГОРАНИЯ ВРД	
§ 1. Особенности рабочего процесса в камере сгорания ВРД	7
§ 2. Основные токсичные вещества. Единицы измерения	21
§ 3. Образование окислов азота	26
§ 4. Образование и окисление частиц твердого углерода	31
§ 5. Особенности образования окиси углерода и углево- дородов	36
§ 6. Влияние основных конструктивных и режимных па- раметров на выход токсичных соединений	38
Глава II. МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЫХОДА ТОКСИЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПУТЕМ МОДИФИКАЦИЙ КАМЕР СГОРАНИЯ И ТОПЛИВА	
§ 1. Вихревая камера сгорания	46
§ 2. Камера сгорания с вихревыми модулями	52
§ 3. Применение в камерах сгорания вихревых пневмати- ческих и акустических форсунок	59
§ 4. Регулирование геометрии камеры сгорания, зонное распределение топлива и перенос воздуха из ком- прессора в атмосферу	60
§ 5. Каталитическая камера сгорания	64
§ 6. Применение присадок к топливу	71

Юрий Алексеевич Кныш

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ВЫХОДА
ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Редактор Э. Грязнова
Техн. редактор Н. Каленюк
Корректор Е. Антонова

Сдано в набор 22.10.79 г. Подписано в печать 12.XII.79 г. ЭО13669.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага оберточная белая. Высокая печать.

Литературная гарнитура. Объем 5 п. л. Усл. п. л. 4,65. Уч.-изд. л. 4,3.

Заказ № 1027. Тираж 500 экз. Цена 15 коп.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени С. П. Королева, г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.