

КУАИ: 6(У)

У 254

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

Б. А. УГЛОВ

**ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА
РЕАКТИВНЫХ
ТОПЛИВ
И НАДЕЖНОСТЬ
АВИАЦИОННЫХ
СИЛОВЫХ
УСТАНОВОК**

КУЙБЫШЕВ

1986

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУТИБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

Б. А. УГЛОВ

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ
И НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ
СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

*Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве учебного пособия*



КУТИБЫШЕВ 1986

Углов Б. А. *Эксплуатационные свойства реактивных топлив и надежность авиационных силовых установок: Учебное пособие.* — Куйбышев: КуАИ, 1986. — 68 с.

В пособии рассмотрены основные вопросы влияния эксплуатационных свойств реактивных топлив (РТ) на летно-технические данные самолета, физические основы рабочего процесса в камерах сгорания ВРД, условия эксплуатации РТ в ЛА и методы определения физико-химических показателей эксплуатационных свойств РТ. Даются краткая характеристика современных и перспективных топлив для ВРД, наиболее важные эксплуатационные свойства РТ и влияние их на работоспособность и эксплуатационную надежность авиационных силовых установок.

Пособие предназначено для студентов старших курсов факультета эксплуатации ЛА и двигателей и может использоваться специалистами по созданию, испытаниям, ремонту и эксплуатации ЛА и двигателей.

Рецензенты: А. А. Трофимов, Е. М. Карпов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Свойства топлив оказывают влияние на важнейшие характеристики самолета, двигателя, их отдельных агрегатов и узлов, к которым относятся летно-технические данные и надежность самолета в целом. Непосредственная взаимосвязь последних с большой совокупностью показателей качества топлива обусловила появление новой науки — химмотологии, изучающей свойства, качества и рациональное использование топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей в технике.

Одним из основных направлений этой науки является изучение эксплуатационных свойств реактивных топлив, проявляющихся в процессе эксплуатации авиационных силовых установок, и их влияние на надежность авиационной техники. Особый интерес к этому направлению обусловлен еще и тем, что рабочий процесс в реактивном двигателе представляет собой значительно более сложный комплекс физических, физико-химических и химических явлений по сравнению с поршневыми двигателями, от которого кроме надежности зависят экономичность двигателя и токсичность отработанных газов.

Далеко не бесконечные запасы природных углеводородов и реальная опасность возникновения необратимых изменений в атмосфере Земли, вследствие загрязнения ее токсичными продуктами неполного сгорания, поднимают значимость этих вопросов на уровень актуальнейших проблем современной науки и техники.

1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ТОПЛИВ В СИЛОВЫХ УСТАНОВКАХ ЛА

1.1. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ НА ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ САМОЛЕТА

Количество тепла, которое можно получить при сжигании имеющегося в баках самолета топлива, определяется объемной теплотворностью или энергоемкостью топлива и емкостью баков, т. е. произведением рабочего объема баков V_3 на энергоемкость $Hu \rho$ (где Hu —низшая теплота сгорания, ρ —плотность топлива) или на количество тепла, выделяемого при сгорании 1 м³ топлива (табл. 1) [1, 14, 19, 23]: $Q = V_3 Hu \rho$.

Таблица 1

Энергоемкость реактивных топлив по средним данным

Топливо	Плотность, кг/м ³	Теплота горения, ккал/м ³	Энергоемкость (в ккал/м ³) при $T_{\text{топл.}}$ °С		
			+20	0	-20
T-5	845	10250	8661250	8810000	8960000
T-6	840	10300	8652000	8800000	8950000
T-1	800	10250	8200000	8340000	8480000
T-8	785	10300	8085500	8230000	8370000
T-7	775	10300	7982500	8120000	8250000
PT	775	10300	7982500	8120000	8250000
ТС-1	775	10250	7943750	8080000	8200000
T-4	770	10300	7931000	8070000	8200000
T-2	755	10300	7716500	7900000	8050000
Б-70	730	10400	7592000	7760000	7940000

Здесь рабочий или эксплуатационный объем баков (в кубических метрах) определяется выражением

$$V_3 = \frac{m_0 + m_p}{\rho} + V_{II} + V_{III} = V_6 - V_k - V_c.$$

где m_0 — масса топлива, необходимая для полета с заданной максимальной дальностью, кг;

m_0 — масса резервного запаса топлива на 45 мин полета на крейсерских режимах и рейсовых эшелонах для магистральных самолетов местных линий, кг;

$V_{\text{н}}$ — невыработываемый остаток топлива (не более 1% от полного объема баков — V_6), м³;

$V_{\text{п}}$ — потери на испарение (0,2% от первоначального количества за 1 ч полета), м³;

$V_{\text{к}}$ — объем баков, занятый конструктивными элементами (датчики, насосы, клапаны и др.) — 2—3% от V_6 , м³;

$V_{\text{с}}$ — свободный объем баков, необходимый на случай расширения топлива при нагреве (2% от V_6), м³.

В этом случае можно принять $V_3 = 0,95 V_6$.

Повышенная энергоемкость утяжеленных керосинов (Т-5 и Т-6) по сравнению с широкофракционными (Т-2) и бензинами объясняется тем, что содержащиеся в них в большом количестве ароматические углеводороды обладают на 10—15% большей плотностью, в отличие от углеводородов парафинового ряда, и на 4—6% меньшей теплотой сгорания. Из этой же таблицы видно, что понижение температуры, приводящее к увеличению плотности примерно на 1% на каждые 10°С, увеличивает на 1% энергоемкость топлива.

Дальность полета ЛА зависит от энергоемкости топлива, поскольку влияние удельной теплоты сгорания и плотности топлива на этот показатель неравномерно: увеличение бортового запаса топлива за счет его плотности приводит к росту полетного веса ЛА и, таким образом, к повышению расхода топлива в двигателях, поскольку часть увеличенного топлива затрачивается на перевозку его самого [8]:

$$\Delta M_{\text{т}} = M_{\text{т}}^{\text{з}} \frac{K}{c_{\text{y1}} \tau_0} \left(e^{\frac{c_{\text{y}} \tau_0}{K}} - 1 \right) - M_{\text{т}}^{\text{з}},$$

где $\Delta M_{\text{т}}$ — масса топлива, энергия которого расходуется для перевозки топлива;

$M_{\text{т}}^{\text{з}}$ — заправка ЛА топливом;

c_{y1} — удельный расход топлива;

τ_0 — расчетное время полета;

K — среднее за время полета значение коэффициента аэродинамического качества.

В свою очередь, удельный расход топлива [13]

$$c_{\text{y1}} = \frac{1}{g} \left\{ \sqrt{\frac{3600 g_{\text{т}}}{2 g \cdot 127 \eta_z \eta_{\text{т}} \frac{\Pi u \eta_z}{\alpha L_0} + 1^2 - 1}} \right\}$$

обратно пропорционален корню квадратному из $Q_{\text{ф}}$ — фактическому количеству тепла, выделившегося при сгорании 1 кг топ-

лива (η_z — коэффициент выделения тепла: $\eta_z = Q_\phi / Hu$, тогда $c_{уд} = A' / V Q_\phi$).

Здесь g_τ — весовое отношение топлива к воздуху;

η_g — относительный коэффициент, показывающий, насколько практическая скорость истечения отличается от теоретической;

η_t — термический КПД;

α — коэффициент избытка воздуха;

L_0 — количество воздуха, теоретически необходимого для сгорания 1 кг топлива;

V — скорость полета.

Следует напомнить (см. табл. 1), что с увеличением плотности керосина теплота сгорания его уменьшается.

Из курса аэродинамики теоретическая дальность полета с постоянной скоростью V при постоянном аэродинамическом качестве K

$$L = \frac{K}{g} \eta_0 \bar{P}_{эф} Hu \ln \frac{1}{1 - \bar{m}_\tau},$$

где $\eta_0 = \frac{PV}{G_\tau (Hu + \frac{V^2}{2})}$ — полный КПД двигателя, зависящий от

тяги P , расхода топлива G_τ , его теплоты сгорания Hu и скорости полета V ;

$\bar{P}_{эф} = P_{эф} / P$ — коэффициент относительного уменьшения эффективной тяги $P_{эф}$ двигателя за счет внешнего сопротивления силовой установки;

\bar{m}_τ — отношение массы топлива, расходуемого в полете с постоянной скоростью, к начальной массе самолета.

Из этих рассуждений видно, что чем выше теплота сгорания топлива, тем меньше расход топлива на создание заданной тяги, тем больше дальность и продолжительность полета.

1.2. ПРЕВРАЩЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ (ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ) ЭНЕРГИИ ТОПЛИВА В РАБОТУ В ВРД

Тяга, развиваемая двигателем в результате сгорания топлива, определяется секундным расходом воздуха G_B и топлива G_τ через двигатель и разностью осевых скоростей рабочего тела: воздуха V на входе в двигатель (скорость полета) и истечения продуктов сгорания из двигателя U :

$$P = \frac{G_B}{g} (U - V) + \frac{G_\tau}{g} U.$$

Поскольку расход топлива (при коэффициенте избытка воздуха в ВРД $\alpha = 3 \dots 5$) меньше расхода воздуха в 60...80 раз, вторым членом с ошибкой в 1,5...2,0% можно пренебречь.

С этим же допущением можно написать уравнение, связывающее скорость истечения продуктов сгорания и избыточного воздуха с теплотой сгорания в соответствии с законом перехода потенциальной (тепловой) энергии топлива в кинетическую энергию рабочего тела:

$$\frac{G_n (U^2 - V^2)}{2g} = 427 \eta_t H_u G_T.$$

Термический КПД в данном случае может быть оценен по приближенному выражению

$$\eta_t \approx \frac{c_1 T_{гор} - c_2 T_{сопла}}{c_1 T_{гор} - c_3 T_{н}},$$

где $c_{1,2,3}$ — теплоемкости газов и воздуха;

$T_{г,с,н}$ — температура горения на срезе сопла двигателя и наружного воздуха соответственно.

Заменив $\dot{C}_в = \alpha L_0 G_T$ для 1 кг воздуха, уравнение энергий запишем в виде

$$\frac{U^2 - V^2}{2g} = 427 \eta_t \frac{H_u}{\alpha L_0}.$$

Тогда скорость истечения рабочего тела определится из уравнения

$$U = \sqrt{2g 427 \eta_t \frac{H_u}{\alpha L_0} + V^2}.$$

В этом случае удельная тяга ВРД запишется в виде:

$$P_{уд} = \frac{U - V}{g} = \frac{1}{g} \left\{ \sqrt{2g 427 \eta_t \frac{H_u}{\alpha L_0} + V^2} - V \right\}.$$

На установившемся режиме $P_{уд} \approx V \sqrt{H_u}$.

13. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ВРД

Основным назначением камеры сгорания в реактивном двигателе является эффективное превращение химической энергии, заключенной в топливе, в тепловую и затем кинетическую энергию выхлопных газов.

Воздушный поток на выходе из компрессора претерпевает торможение в диффузоре. Скорость при этом снижается до 50—80 м/с, давление повышается. Параметры заторможенного

потока на входе в камеру сгорания определяются скоростью, энтальпией, давлением и характером торможения (конфигурацией и режимом работы входного устройства, определяющими поле скоростей; степенью и масштабом турбулентности).

Поступающий в камеру сгорания воздух разделяется фронтным устройством на первичный (20—30% от общего потока), формирующей рециркуляционную зону с составом топливовоздушной смеси, близким к стехиометрическому (в этот поток осуществляется впрыск топлива и происходит выгорание основной его массы), и вторичный — охлаждающий стенку жаровой трубы и струями втекающий в камеру сгорания. На струях вторичного воздуха, прошедшего через первый ряд крупных отверстий, происходит догорание топлива. Последующие потоки вторичного воздуха необходимы для снижения среднемаховой температуры продуктов сгорания и формирования необходимого поля температур перед лопатками турбины.

Топливо подается в камеру сгорания через центробежные или струйные форсунки, расположенные по потоку, против потока или под определенным углом к нему. Используются и другие типы форсунок: пневматические, акустические. Истечение и распыливание топлива оказывают решающее влияние на процессы, происходящие в камере сгорания, зависящие, в свою очередь, от конструктивных особенностей форсунок, аэродинамики и параметров воздушного потока (скорости, давления, температуры и влажности, перепада давления топлива на форсунках; плотности, вязкости и поверхностного натяжения топлива, упругости насыщенных паров и др.).

Жидкое топливо, вытекающее из форсунки, под влиянием турбулентности на поверхности струи или конуса распыла и аэродинамических сил, возникающих при взаимодействии движущейся жидкости с воздушным потоком, дробится на отдельные капли (рис. 1) [18]. Средний диаметр капель $d_{ср}$ определяется эмпирическим выражением

$$\frac{d_{ср}}{d_f} = \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{0,7} + \left(\frac{\nu_r}{\nu_0} \right)^{0,41} \right]^3 \sqrt{\frac{P_0}{P_2}} \frac{\mu_f}{A M^{0,527}},$$

где σ и ν_1 — поверхностное натяжение и кинематическая вязкость распыливаемого топлива;

σ_0 и ν_0 — то же для эталонной жидкости;

P_0, P_2 — атмосферное давление и противодавление на выходе из форсунки;

A — эмпирический коэффициент дробления;

$M = U / \sqrt{gkRT}$ — число M при движении топлива относительно воздуха;

d_f и μ_f — диаметр сопла и коэффициент расхода форсунки.

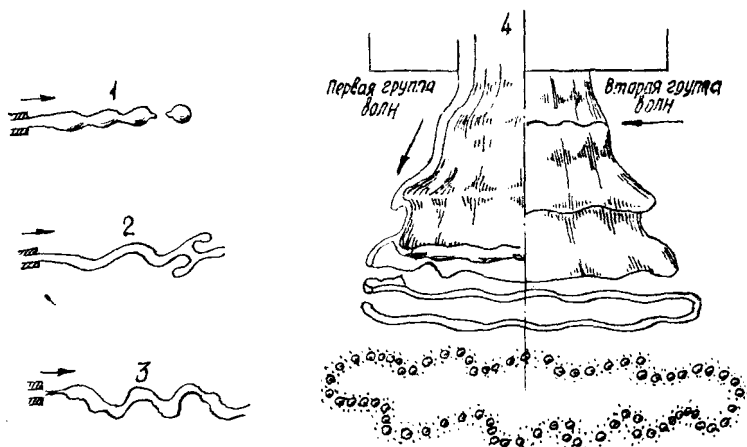


Рис. 1. Схема распада жидкости при истечении из струйной (1—3) и центробежной (4) форсунок: 1 — развитие симметричных возмущений; 2 — развитие асимметричных возмущений; 3 — падение симметричных и развитие асимметричных возмущений (показан более интенсивный рост асимметричных возмущений); 4 — длинноволновые возмущения жидкой пленки

Спектр распыла аппроксимируется известным законом распределения:

$$\frac{G_i}{G_0} = 1 - e^{-0,693 \left(\frac{d_k}{d_{cp}} \right)^{3 \dots 3,5}},$$

где G_i — весовое количество капель размером меньше d_k ;

G_0 — вес всех капель;

d_k — диаметр капель, изменяющийся от $d > d_{cp}$ до $d < d_{cp}$.

Теоретического решения вопроса о распыливании жидкости и о распределении капель по размерам до настоящего времени нет.

При попадании капли в свободный поток (при выходе из затененной зоны за форсункой) капля претерпевает вторичное дробление (рис. 2) [4]. Условие вторичного дробления капли записывается в виде

$$D_k = \frac{8}{c_x} > \frac{\rho_l U^2}{g \sigma} d_k,$$

т. е. тоже зависит от свойств топлива. Здесь D_k — критерий дробления, определяемый экспериментально; c_x — аэродинамический коэффициент сопротивления капли, зависящий от Re . При $D_k = 10,7$ происходит раздвоение капли, при $D_k = 14$ — дробление.

Капли, образовавшиеся при распыле топлива и движущиеся по баллистическим траекториям, постепенно испаряются за счет внутренней энергии и подводимого от факела пламени тепла. Скорость испарения капли в потоке описывается выражением [18, 24]

$$\frac{da^2}{d\tau} = -\frac{8\gamma_{см}D_{п}}{\gamma_{г}} \left(\frac{1-C_{\infty}}{1-C_0} \right) (1 + 0,3\varphi\sqrt{\text{Pr}}\sqrt{\text{Re}});$$

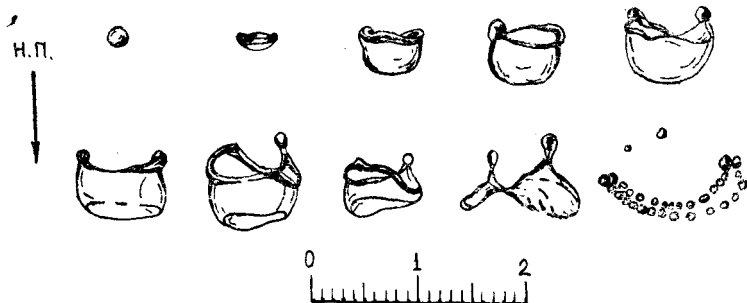


Рис. 2. Последовательные фазы вторичного дробления миллиметровой капли (стрелка показывает направление потока воздуха)

показывающим зависимость изменения размеров капли a во времени τ от плотности, испаряемости и других свойств топлива.

Здесь $\gamma_{см} = \gamma_{п} \frac{P_{п}}{P} + \gamma_{в} \frac{P - P_{п}}{P}$ — удельный вес паровоздушной смеси;

$D_{п}$ — коэффициент молекулярной диффузии пара;

C_{∞} — безразмерная концентрация паров топлива в окружающей среде;

$C_0 = \frac{1}{\frac{\mu_{в}}{\mu_{п}} \left(\frac{P}{P_{п}} - 1 \right) + 1}$ — то же на поверхности капли;

$\mu_{в}$, $\mu_{п}$ — соответственно молекулярный вес воздуха и паров топлива;

$P_{п}$ — давление насыщенных паров топлива;

P — статистическое давление;

φ — фактор влияния теплообмена на динамическое испарение;

Pr — число Прандтля;

Re — число Рейнольдса.

Испарение капли зависит от давления среды впрыска (пропорционально \sqrt{P}), температуры поверхности капли, потерь тепла на ее прогрев (определяется термодинамическими свойствами топлива), времени прогрева, скорости отвода паров

топлива от капли и др. Для бензина время прогрева составляет 10%, для керосина — 25% от времени испарения. При этом капля керосина нагревается до 160°C, бензина — до 80°C.

Часть крупных капель не успевает испариться до фронта пламени и продолжает испаряться в зоне горения при возрастающей температуре и скорости потока. При этом большое значение имеет процесс фракционирования топлива, при котором за счет преимущественного испарения легких фракций происходит утяжеление его состава, уменьшение давления насыщенных паров (при испарении 60% капли давление насыщенных паров уменьшается на 20%) и увеличение температуры равновесного испарения, что приводит к уменьшению скорости испарения. Этот процесс оказывает отрицательное влияние на развитие горения и увеличивает физический недожог за счет медленного испарения остатка и уменьшения времени пребывания капель в ускоренном потоке. Однако в случае интенсивного теплоподвода (диффузионное горение капель углеводородного топлива) скорость испарения капель превосходит скорость фракционирования.

Предварительное перемешивание паров топлива с воздухом в условиях высоких температур (при контакте с открытым пламенем) сопровождается переносом тепла и активных центров из зоны горения в свежую топливовоздушную смесь (рис. 3). Это приводит к развитию предпламенных реакций. Такой период скрытого протекания реакции между моментом смешения или нагрева капель и моментом появления внешних эффектов процесса горения условно называют периодом индукции. Таким образом, топливо, поступающее в камеру сгорания двигателя через форсунки, воспламеняется не мгновенно, а через время,

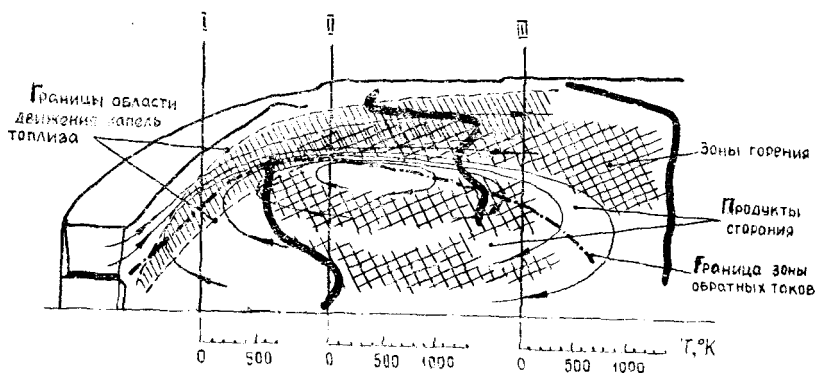


Рис. 3. Схема рабочего процесса в начальном участке жаровой трубы с лопаточным завихрителем

необходимое для частичного испарения капель, с образованием в отдельных газовых объемах благоприятной для горения топливовоздушной смеси и периода индукции. Полный период (время) задержки воспламенения t_3 для керосина [24] определяется выражением, в основе которого лежит закон Аррениуса, описывающий зависимость скорости химических реакций от температуры:

$$t_3 = A_1 e^{-E/RT},$$

где E — энергия активации.

Время задержки воспламенения уменьшается с ростом начальной температуры топлива и давления в камере сгорания; зависит от вида топлива, концентрации компонентов и конструктивных особенностей камеры. Следует отметить, что конструкция камеры сгорания должна обеспечивать время пребывания топливовоздушной смеси в зоне смешения большее, чем время испарения, но меньшее, чем время задержки воспламенения. При этом температура смеси в течение времени пребывания в зоне смешения и испарения должна иметь значения, исключающие самовоспламенение [7]. Это необходимо потому, что горение капель топлива сопровождается интенсивным образованием окислов азота NO_x , радикалов и молекул типа HC , C_2 , несгоревших углеводородов в виде исходного топлива (физический недожог), в виде частично окисленных компонентов топлива (химический недожог) и других токсических веществ. В настоящее время сложилось мнение о том, что авиационные двигатели являются одним из возможных источников широкого распространения канцерогенов (ароматические полициклические углеводороды, например, бенз(а)пирен) в атмосфере. Самовоспламенение, расширяя зону горения, приводит к перегреву элементов конструкции камеры.

В камере сгорания ГТД процессы смесеобразования и горения условно можно разделить. В этом случае горение представляет собой процесс турбулентного смешения продуктов сгорания, имеющих высокую температуру, и гомогенной (в случае идеального протекания процессов испарения и смешения) свежей смеси с одновременным реагированием последней в слоях молекулярного смешения. Сокращенно такой процесс называется гомогенным горением. Горение перемешанного топлива в воздухе называется диффузионным горением. В реальных условиях в камере сгорания ВРД имеют место оба вида горения.

В настоящее время существует несколько моделей горения, каждая из которых в той или иной степени описывает процесс горения в лабораторных условиях. К основным относятся модель поверхностного горения Г. Дамкеллера и К. И. Щелкина, объясняющая увеличение скорости турбулентного горения

(в 2—3 раза) по сравнению с ламинарным искривлением фронта пламени (т. е. увеличением площади горения) турбулентными пульсациями; объемная модель (К. И. Щелкин, М. Саммерфильд, Е. С. Щетинков), предполагающая резкое увеличение коэффициента диффузии по сравнению с ламинарным пламенем; модель микрообъемного горения (Е. С. Щетинков), объясняющая турбулентное горение молекулярным перемешиванием микромолей и сгоранием по законам объемных реакций тех из них, температура которых достаточно высока.

Обобщая большое количество опытных данных, А. В. Талантов предлагает формулу для определения скорости турбулентного горения U_T в закрытых каналах [22]:

$$U_T = [(\Theta - 1) C']^{0,8} U_n^{0,2},$$

где $\Theta = T_r / T_k$ — относительный подогрев в камере;

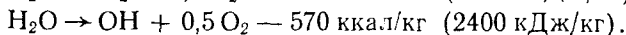
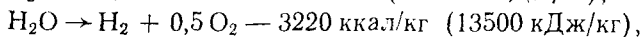
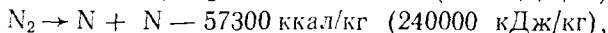
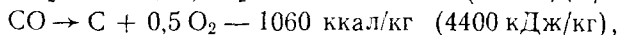
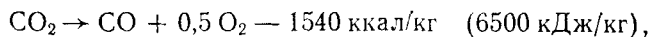
T_k и T_r — соответственно температура газа за компрессором и камерой сгорания;

C' — средняя величина пульсаций скорости воздушного потока;

U_n — нормальная скорость горения (относительная скорость движения фронта пламени в неподвижной топливоздушном смеси).

Последняя величина является физико-химической постоянной для конкретного топлива и условий его сжигания, показывающая, что характеристики топлива, при прочих равных условиях, играют существенную роль в количественном выражении скорости турбулентного горения.

Высокие температуры в зоне горения (выше 1800°C) вызывают термическую диссоциацию молекул рабочего тела, проходящую с поглощением тепла:



Снижение теплового эффекта сгорания топлива из-за диссоциации может быть очень значительным, особенно при низких давлениях (десятки процентов). В большей степени диссоциации подвержены многоатомные молекулы. В связи с этим по одной из важнейших характеристик — теплоте сгорания — нельзя иметь четкое представление об эффективности топлива: гидразин (N_2H_4) с невысокой теплотой сгорания, равной 8120 кДж/кг (окислитель — жидкий кислород), обеспечивает получение более высокой удельной тяги (329 даН·с/кг), чем топли-

ва с большей теплотой сгорания с тем же окислителем, например, керосин ($Hu = 9500$ кДж/кг), образующие высокомолекулярные газы ($P_{уд} = 304$ даН·с/кг).

Коэффициент диссоциации описывается выражением [2/]

$$\eta_{дисс} = \frac{Hu - Hu_{дисс}}{Hu} \approx \frac{k}{k-1} \frac{R}{p_k} \frac{T^*_r}{Hu},$$

где $k = c_p/c_v$ — показатель адиабаты. Т. е. химический состав и термодинамические свойства топлива связаны с процессами диссоциации молекул продуктов сгорания, приводящими к тому, что выбрасываемое из двигателя рабочее тело (смесь продуктов сгорания и воздуха) обладает запасом химической энергии, не перешедшей в тепловую. Этот запас тем больше, чем выше температура сгорания.

Таким образом, теплота сгорания определяет располагаемую энергию топлива, а термодинамические свойства продуктов сгорания — возможность ее использования для получения механической работы и создания тяги.

1.1. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ В ЛА

Большое количество агрегатов и элементов различных систем авиационных силовых установок подвержены воздействию физических и химических факторов, обусловленных контактированием с топливом или продуктами его окисления. Это приводит к тому, что свойства топлива влияют на работоспособность жизненно важных узлов ЛА, т. е. имеют прямую и неразрывную связь с надежностью авиационной техники и безопасностью полетов.

В настоящее время топливо на борту ЛА используется не только как источник тепловой энергии, но и для выполнения ряда других функций: в качестве рабочего тела в силовых агрегатах и регуляторах; хладагента в теплообменниках (в топливомасляных радиаторах, в системе кондиционирования воздуха, в системе охлаждения радиоэлектронной аппаратуры и др.); выполняет роль смазки с одновременным отбором тепла в силовых опорах некоторых двигателей и др. В некоторых случаях топливо рассматривается как четырехфазная система, содержащая кроме жидкой твердую фазу, представленную микрозагрязнениями, газовую фазу в виде растворенного воздуха и биофазу, насчитывающую около 100 видов микроорганизмов.

Топливная система ЛА относится к числу наиболее ответственных с точки зрения безопасности полета, поскольку она непосредственно влияет на работоспособность двигателя и через

него — на действие систем управления, связанных с пилотированием самолета или вертолета.

В свою очередь, работоспособность агрегатов топливной системы главным образом зависит от безотказного функционирования подвижных сопряжений, входящих в конструкцию насосов высокого давления, аппаратуры топливной автоматики и др. Такие соединения представляют собой прецизионные пары трения, т. е. сопряженные подвижные детали, выполненные с высокой степенью точности и чистоты, обеспечивающие щелевое, бесконтактное уплотнение. В авиационных агрегатах точность изготовления не ниже 2-го класса с шероховатостью поверхности не ниже 8-го класса, с величиной диаметрального зазора 10—15 мкм. Скорость относительных перемещений колеблется от 1 мм/с до 2 м/с и более с усилиями от нескольких десятков до сотен ньютонов. При этом необходимо обеспечить малые усилия трения и отсутствие утечек.

Топлива, находящиеся в топливных системах современных самолетов, должны сохранять свои физико-химические и эксплуатационные свойства в широком диапазоне температур (от -60°C до нескольких сот градусов выше нуля), при давлениях от сотен атмосфер до значений, соответствующих высоте полета большей, чем 20000 м, при движении по трубопроводам с большими скоростями, т. е. при условии неблагоприятных электромагнитных взаимодействий с металлами.

Поэтому к физико-химическим показателям и эксплуатационным свойствам топлив для реактивных двигателей предъявляются весьма разносторонние требования, отклонение от которых влечет за собой ухудшение летно-технических и эксплуатационных характеристик ЛА и двигателей и их надежности.

В свете всего вышесказанного узлы и агрегаты систем силовых установок, надежная работа которых зависит от свойств топлив, подразделяются на две основные группы:

а) агрегаты и узлы, контактирующие с топливом в жидкой фазе (насосы, трубопроводы, форсунки, силовые элементы управления реактивным соплом, теплообменники);

б) агрегаты и узлы газового тракта двигателя, омываемые продуктами сгорания (основные и форсажные камеры сгорания, газовые турбины, реактивные сопла).

1.5. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

Исследования и испытания реактивных топлив позволяют в лабораторных условиях оценить их кондиционность, соответ-

ствие физико-химических показателей и эксплуатационных свойств установленным нормам [1, 15, 19, 23].

1) Основное влияние на показатели и свойства топлив оказывает их состав: фракционный состав, количество непредельных и ароматических углеводородов.

Фракционный состав в лабораторных условиях определяется разгонкой 100 см³ испытуемого топлива. Температура пробы, при которой падает первая капля сконденсированных в холодильнике паров, принимается за температуру начала кипения. За температуру конца кипения принимается температура выкипания 97,5—98,0% топлива.

Количество непредельных углеводородов (H , %) рассчитывается по йодному или бромному числу и молекулярному весу:

$$H = 0,39 \cdot I \cdot M \text{ и } H = 0,627 \cdot B \cdot M,$$

где M — молекулярный вес топлива, г;

I — йодное число в г йода на 100 г топлива, т. е. количество йода, присоединившегося к непредельным углеводородам, содержащимся в 100 г топлива;

B — бромное число в г брома на 100 г топлива.

Молекулярный вес определяется криоскопическим методом: навеску топлива $a = 0,2—0,3$ г растворяют в $G = 23—25$ мл криоскопического бензола и при перемешивании определяют температуру замерзания с точностью до 0,01°C, тогда

$$M = 5,12 a 1000 / G \Delta t,$$

где Δt — разность между температурами замерзания чистого бензола и раствора топлива в бензоле.

Содержание ароматических углеводородов в количественном отношении оценивается люминесцентно-хроматографическим методом: образец топлива в 99% изопропиловом спирте облучается ультрафиолетовым светом с длиной волны 0,365 мкм. Совпадение с результатами других лабораторий — 3%.

Работа спектрофотометра СФ4 с длиной волны 0,285 мкм основана на отсутствии поглощения этой длины волны насыщенными углеводородами и интенсивном поглощении бициклоароматическими (в 10 раз выше, чем моноциклоароматическими). Количество бициклоароматических углеводородов (C , % веса) определяется по формуле

$$C = \frac{D_{285}}{33,7 c_T},$$

где D_{285} — оптическая плотность при длине волны 0,285 мкм;
 c_T — концентрация топлива в изооктане в г/л.

2) *Давление насыщенных паров* определяется при соотношении паровой и жидкой фаз 4:1 при температуре 37,8°C

(100° F). Давление замеряется манометром с учетом поправки на изменение давления воздуха от температуры. Для сверхзвуковых самолетов давление насыщенных паров определяется при более высокой температуре.

3) *Испаряемость топлива* в широком диапазоне температур (0—200°С) и давлений (до 2,5 кПа — около 30 мм рт. ст.) производится на установке с термостатом, холодильником и медленной откачкой воздуха вакуумным насосом. По взвешиванию испарителя через 90 мин определяют потери топлива на испарение в процентах.

4) *Склонность топлива к электризации* определяется путем измерения плотности заряда объема топлива, находящегося в зазоре между неподвижным цилиндрическим корпусом и вращающимся цилиндрическим ротором, имеющими выделенные изолированные участки [17]: $q = UC/V$, где U — разность потенциалов между выделенными участками; C — емкость системы; V — объем испытуемого вещества.

За рубежом электризуемость топлив оценивается по их электропроводности.

5) *Оценка характеристик горения* производится на горелках разного типа: нормальная скорость горения определяется на бунзенской горелке (ламинарное пламя, однородная топливозодушная смесь); коэффициент полноты сгорания оценивается на основании анализа продуктов сгорания в жаровой трубе диффузионной горелки; диапазон устойчивого горения по составу смеси определяется в барокамере с диффузионной горелкой; люминометрическое число, характеризующее интенсивность свечения пламени, определяется в лампе с фитильной горелкой; интенсивность свечения и температура над пламенем измеряются фотоэлементом с желто-зеленым светофильтром и термопарой для тетралина, изооктана и испытуемого топлива (при одинаковой светимости):

$$\text{ЛЧ} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{тр}}}{T_{\text{из}} - T_{\text{тр}}} \cdot 100,$$

где $T_{\text{н}}$, $T_{\text{тр}}$, $T_{\text{из}}$ — температура горения испытуемого топлива, тетралина и изооктана соответственно.

6) *Высота некопящего пламени*, оценивающая нагарообразующую способность топлива, определяется измерением наибольшей высоты пламени в фитильной лампе до появления копоти. По этому показателю вычисляется индекс дымления и летучести (ИДЛ):

$$\text{ИДЛ} = H + 0,42 X,$$

где H — высота некопящего пламени;

X — количество фракций в процентах (объем), выкипающих до 204,4°С.

7) Одной из важнейших характеристик, определяющей энергетические возможности топлива, является теплота сгорания, т. е. количество тепловой энергии, выделяемой при сгорании 1 кг топлива в атмосфере кислорода или воздуха. При сжигании топлива в калориметре по нагреву воды определяют низшую теплоту сгорания и с учетом тепла, выделяемого при охлаждении продуктов сгорания до 25°C , т. е. с учетом тепла, выделившегося при конденсации паров воды из продуктов сгорания, определяют высшую теплоту сгорания.

8) Первичная оценка противозносных свойств топлив производится путем измерения с помощью конденсатора переменной емкости контактной разности потенциалов металлической пластинки ($45 \times 15 \times 3$ мм) до и после выдерживания ее в испытуемом топливе в течение 3 мин. В настоящее время разработаны установки и приборы, основанные на трении скольжения или качения испытуемых образцов в опытном топливе, дающие хорошее приближение к стендовым и летным испытаниям.

9) *Стабильность топлив* определяется в статических условиях или при перемешивании топлив и на лабораторных установках циркуляционного и проточного типов. Оценка ее производится по количеству фактических, т. е. растворенных в топливе смол, непредельных углеводородов и по величине индукционного периода (определяется временем в минутах от момента контакта топлива с кислородом в закрытом сосуде при температуре 100°C под давлением $709,1$ кПа до начала падения давления — т. е. до начала взаимодействия топлива с кислородом). Термоокислительная стабильность реактивных топлив определяется при более высокой температуре.

Лабораторными испытаниями оцениваются также коррозионная агрессивность топлив, их низкотемпературные свойства, огнеопасность и др. В топливе определяются содержание и характер сернистых, кислородных и азотистых соединений, минеральных примесей и воды.

Испытания на реальных агрегатах и системах ЛА и двигателя проводятся для оценки испаряемости топлив в реальных условиях, тонкости распыливания, прокачиваемости, характеристик горения.

Стендовые испытания (следующий этап) на полноразмерных двигателях выявляют возможности топлива по обеспечению основных характеристик двигателя и влияние топлив на его техническое состояние.

Испытания топлив в летных условиях относятся к методам оценки их эксплуатационных свойств, позволяющих выявить особенности эксплуатации конкретной авиационной техники на испытуемом топливе, ее работоспособность и надежность.

2. СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ВРД

2.1. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РЕАКТИВНЫЕ ТОПЛИВА

С технико-экономической и эксплуатационной точек зрения целесообразно иметь единый, унифицированный сорт реактивного топлива, пригодного для дозвуковых и сверхзвуковых самолетов. Это значительно уменьшит эксплуатационные расходы, связанные с хранением и транспортированием топлива.

С появлением реактивной авиации был разработан ряд топлив на основе нефтепродуктов, получаемых прямой перегонкой, с использованием термического и каталитического крекинга с учетом выполнения одного из существенных требований — получение топлив с наименьшей затратой средств в больших количествах.

История реактивных топлив началась с исследования тракторного керосина ТК (1946 г.), обладавшего, как выяснилось, повышенной нагарообразующей способностью, низкой полнотой сгорания и недостаточной химической стабильностью из-за содержания повышенного количества ароматических углеводородов и компонентов термического крекинга.

Керосины А (1947 г.) и К-1 (1948 г.) явились основой для создания топлива Т-1 (1949 г.), представлявшего значительный успех отечественной нефтеперерабатывающей промышленности. Керосин Т-1 представляет собой продукт прямой перегонки бакинской или сахалинской малосернистых нефтей с пределами выкипания 150—280°C. Длительное время по своим эксплуатационным свойствам Т-1 превосходил зарубежные реактивные топлива. Недостатком его является относительно малая стабильность при высоких температурах, т. е. Т-1 пригоден только для дозвуковой авиации.

В 1952 году были разработаны топлива широкого фракционного состава прямой перегонкой серпистых нефтей Т-2 и Т-3 и бензилолигроиннокеросиновые фракции термического крекинга Т-4. Обогащенные коррозионно-активными меркаптанами (соединения типа $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{H}$) топлива Т-2 и Т-3 вызвали кор-

розно элементов топливной аппаратуры и, имея хорошие пусковые свойства благодаря наличию бензиновых фракций, имели плохие противозносные свойства, приводящие к выходу из строя прецизионных пар. В дальнейшем керосин Т-3 был снят с производства. Т-2 продолжал совершенствоваться. Выход модификаций Т-2 по годам: 1955, 1957, 1962. Получается путем прямой перегонки нефтей и имеет ограниченное применение, поскольку обладает высоким давлением насыщенного пара по сравнению с другими керосинами, что способствует развитию кавитации в топливной системе на меньших высотах и с меньшей скороподъемностью. Керосин Т-4, ввиду недостаточной стабильности, вызывает забивку топливных фильтров твердыми смолистыми осадками, и по элементам топливной системы наблюдаются обильные смолистые отложения. В настоящее время не применяется.

Не получившее распространение тяжелое термостабильное топливо Т-5 (1959 г.) с плотностью 845 кг/м^3 и температурой начала перегонки 195°C имело недостаточно высокую термическую стабильность и большую вязкость при отрицательных температурах, что приводило к выходу из строя топливных насосов высокого давления. Гидрированное тяжелое ($\rho = 840 \text{ кг/м}^3$) топливо Т-6 (1966 г.) содержит меньшее количество ароматических углеводородов, нестабильных и коррозионно-активных примесей и вполне пригодно для сверхзвуковой авиации, однако из-за высокой стоимости не может быть массовым топливом.

В этом же, 1966 году, путем гидроочистки топлива ТС-1 было получено термостойкое топливо Т-7 (ТС-1Г) с меньшей коррозионной агрессивностью в жидкой фазе. Степень гидрирования $[10-100 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ водорода при } P \geq 30 \text{ кг/см}^2 (29400 \text{ гПа}) \text{ и температуре } 400^\circ\text{C} \text{ пропускается через ТС-1}]$ сернистых соединений 90—95%, ненасыщенных соединений 70—85%, выход топлива Т-7 97—98%. Долительные стендовые и летные испытания показали низкие противозносные свойства и повышенную газовую коррозию элементов газового тракта двигателя под влиянием микропримесей металлического катализатора (Al—Co—Mo или Al—Ni—Mo). В настоящее время не выпускается.

Утяжеленное топливо Т-8 (1969 г.) обладает хорошей термической стабильностью, низким давлением насыщенных паров и используется в качестве массового топлива для сверхзвуковой авиации.

Попытка создать унифицированное топливо привела к запуску в производство керосина РТ (1971 г.), отличающегося от Т-1 лучшими противозносными свойствами и меньшей нагарообразующей способностью, большей термоокислительной стабильностью (после выдержки при температуре 150°C в течение 5 ч—

на 100 мл топлива не более 6 мг осадка). С применением присадок, улучшающих некоторые эксплуатационные свойства, топливо РТ по своим характеристикам превосходит аналогичные зарубежные топлива и является основным керосином для дозвуковой авиации.

При удалении легких (выкипающих до температуры 165°C) фракций из керосина РТ вновь полученное топливо является керосином Т-8. Это топливо было разработано для самолета Ту-144.

Основные характеристики отечественных реактивных топлив, используемых в ГА, приведены в табл. 2 [1, 13, 14, 19, 23].

Т а б л и ц а 2

Основные характеристики отечественных реактивных топлив

Показатель	Т-1	ТС-1	Т-7	РТ	Т-8
Плотность при 20°C, кг/м ³	800	755	775	775	785
Температура начала перегонки, °C	150	150	150	135	165
98% по объему отгоняется при температуре, °C	280	250	250	280	280
Вязкость кинематическая, сСт:					
при 20°C	1,50	1,25	1,25	1,25	1,15
при -40°C	16,00	8,00	8,00	16,00	16,00
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,92	42,92	43,12	43,12	43,12
Высота неконящего пламени, мм	20	25	25	25	24
Кислотность, мг КОН на 100 мл топлива	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5
Подное число, г воды на 100 г топлива	2,0	3,5	0,5	0,5	0,5
Температура вспышки в закрытом тигле, °C	30	28	28	28	40
Температура начала кристаллизации, °C	60	- 60	- 60	60	- 55
Термическая стабильность при 150° за 5 ч, мг осадка на 100 мл топлива	18	10	6	6	6
Фактические смолы, мг на 100 мл топлива	6	5	4	4	4
Общая сера, %	0,10	0,25	0,05	0,10	0,10
Зольность, %	0,003	0,003	0,003	0,003	
Люминиметрическое число	53	62,5		61,5	54
Игарное число	121,5	83	71	88	95

2.2. РЕАКТИВНЫЕ ТОПЛИВА ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН

Наиболее широкое применение [1, 13, 23] получили топлива типа керосина АТК (*Aviation turbine kerosine*), регламентированные национальными спецификациями, эквивалентными английской спецификации, и *JP (Jet Propulsion)* — спецификации США, английские *Avtur-50*, *Avcat-48*, топлива ЧССР *PL-4*, *PL-5* и др. По спецификации нашей страны производятся топлива Т-1 (ГДР, Италия, Франция), ТС-1 (ГДР, Куба, Сирия, Китай, Болгария, Польша) и Т-7 (ЧССР).

Топлива типа АТК имеют разнообразную фирменную маркировку: *A-1*, тип-1, *ATF (Aeroshell turbine Fuel)* — топливо фирмы «Shell», *ETF*, *ATF/650*, *ETFA-1* и др. На международные авиалинии почти всех континентов этот вид топлива поставляется фирмами «Эссо» и «Идемпту». Топлива отличаются высокой термической стабильностью [перепад на фильтре за 5 ч при температуре 150°C не более 10 кПа (76 мм рт. ст.); для РТ—2 кПа, для Т-8 — 6 кПа], определяемой благоприятным углеводородным составом и минимальным содержанием неуглеводородных примесей; температурой кристаллизации — 54...—56°C; в топливах фирмы «Эссо» пониженным содержанием (9,4—13,0%) ароматических углеводородов; низким содержанием меркаптановой и общей серы (0,0003—0,001 и 0,003—0,05% веса соответственно — практически с 1967 года меркаптановая сера в зарубежных топливах не обнаруживается; для РТ и Т-8 соответственно 0,001 и 0,100% веса); высокой коррозионной пассивностью благодаря практическому отсутствию меркаптанов.

По специфике США топливо *JP-1* представляет собой узкую керосиновую фракцию, подверженную гидроочистке. По термической стабильности топливо близко к ТС-1 и предназначено для дозвуковой авиации, однако в последнее время появились сообщения [21] о возможности применения *JP-1* для сверхзвуковых транспортных самолетов. В военной авиации больше не применяется.

Топливо *JP-2* было только экспериментальным. Широкое применение получило топливо *JP-3* расширенного фракционного состава со средним значением упругости пара 300 мм рт. ст. (40 кПа), что затрудняет его применение на больших высотах.

По аналогии с топливом Т-4 на базе продуктов прямой перегонки, продуктов термического и каталитического крекинга получено топливо *JP-4*, которое считается керосином военного времени, когда потребности авиации могут быть удовлетворены прямогонными дистиллятами — выход топлива *JP-4* из нефти увеличивается примерно на 20% по сравнению с прямой пере-

гонкой. В то же время это топливо рекомендовано для сверхзвуковой авиации при скорости полета до 1800 км/ч.

Более тяжелые термически стабильные топлива специальной очистки JP-5, JP-6, RJ-1 и RP-1 рекомендуются для скоростей полета 3600 км/ч (JP-5) и 1800—2400 км/ч. RP-1 рекомендовано для ПВРД и скоростей 2400—3600 км/ч. Это топливо содержит мало ароматических углеводородов и имеет высокую полноту сгорания. В последнее время широко эксплуатируются термостабильные топлива JP-7, JP-8, JP-TS (табл. 3).

Зарубежные топлива в широких масштабах используются с присадками, улучшающими их эксплуатационные свойства.

На основании систематических исследований физико-химических и эксплуатационных свойств зарубежных реактивных топлив разработаны рекомендации по взаимозаменяемости с отечественными топливами. Эти рекомендации отражены в соответствующих инструкциях. Важнейшими характеристиками при сравнении топлив являются: фракционный состав, низкотемпературные свойства, теплота сгорания, коррозионные свойства и др. Они должны быть настолько близкими, чтобы не вызывать никаких нарушений в работе топливной системы и двигателя ЛА.

Таблица 3

Основные характеристики зарубежных реактивных топлив

Показатель	JP-6	JP-7	JP-8	JP-TS	ATF	JP-5
Плотность при 15°C, кг/м ³	805	800	805	780	790	785
Температура начала перегонки, °C	138	182	—	157	160	156
Температура конца перегонки, °C	—	288	288	260	235	246
Температура вспышки, °C	—	60	43	43	49	47
Температура начала кристаллизации, °C	-54	-43	-46	—	-51	-57
Общая сера, %	0,4	0,1	0,4	0,3	0,05	0,1
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	43,0	44,3	43,0	43,0		
Термическая стабильность в динамических условиях при температуре в подогревателе	218	—	149	232		
Перепад давления на фильтре за 5 ч, мм рт. ст./кПа	254 33,8	76 10	76 10	76 10		
Люминиметрическое число	—	75	45	—	58	59

2.3. ПРИСАДКИ К РЕАТИВНЫМ ТОПЛИВАМ

Улучшение эксплуатационных свойств топлив значительно повышает надежность двигателя и ЛА. Это важное направление развивается двумя путями: совершенствованием технологии получения и методов очистки топлив и созданием высокоэффективных присадок, изменяющих в нужном направлении отдельные свойства топлив.

В соответствии с делением узлов и агрегатов топливной системы и двигателя на группы, контактирующие с топливом либо в жидкой фазе, либо с продуктами горения, классификация присадок производится по типам: I — улучшающие эксплуатационные свойства топлив в жидкой фазе, II — улучшающие условия работы камер сгорания и элементов газового тракта и III — полифункциональные (табл. 4).

Таблица 4

Присадки к реактивным топливам

Улучшающие эксплуатационные свойства реактивных топлив в жидкой фазе			Улучшающие условия работы камер сгорания и элементов газового тракта	Полифункциональные
Г р у п п ы				
низкотемпературные	действующие при нормальных температурах	высокотемпературные		
П о д г р у п п ы				
антиводокремнизирующие	антиокислительные	антигермоксидирующие	высококалорийные	
депрессорные	антикоррозионные металлодеактивирующие	противоизносные	воспламенятельные	
	демульгирующие	моющие	повышающие плотность сгорания	
	микробицидные	противопожарные	антигазовые	
	вязкостные			
	антиэлектростатические	антипарообразующие		
	коагулирующие			
	газовыделяющие			

К наиболее распространенным относятся: антиводокристаллизирующие, антиокислительные, антикоррозионные, антиэлектростатические, противозносные, антинагарные и полифункциональные присадки.

Антиводокристаллизирующие присадки вводятся в реактивные топлива для предотвращения образования кристаллов льда [1, 14, 23] при отрицательных температурах. В нашей стране широко используются моноэтиловый эфир этиленгликоля — $C_2H_5OCH_2CH_2OH$ (этилцеллозольв марки А, жидкость II) и тетрагидрофуруриловый спирт (ТГФ). В США используется моноэтиловый эфир этиленгликоля с добавкой 0,4% глицерина (PFA55MB).

Механизм действия этих присадок заключается в следующем: при образовании с водой водородной связи, обеспечивающей повышение растворимости воды в топливе (перечисленные присадки сравнительно легко растворяются в углеводородах), и частичном переходе присадок в водную фазу значительно снижается температура кристаллизации последней.

Летные испытания показали, что забивка топливного фильтра тонкой очистки на пассажирских самолетах начинается при температуре $-5...-10^{\circ}C$ при содержании воды в топливе до 0,01%. Присадки способствуют быстрому (за 3—30 мин) растворению инея в топливном баке и на фильтре. Зависимость температуры кристаллизации водных растворов антиводокристаллизирующих присадок в зависимости от концентрации показана на рис. 4 [2].

В последнее время в ГА применяются жидкости II-M и ТГФ-M, представляющие собой смеси жидкости II или ТГФ в соотношении 1:1 (по массе) с метанолом, что приводит к лучшей растворимости их в топливе. Присадки добавляются в количестве 0,1—0,3% по объему. При добавлении жидкости II-M возможно понижение температуры вспышки топлива на 8—12 $^{\circ}C$.

В большинстве случаев присадки в топливе обнаруживаются в меньшем количестве по сравнению с дозировкой. Отстой из баков, не смешивающийся с топливом, имеет бурую, черную или фиолетовую окраску, обус-

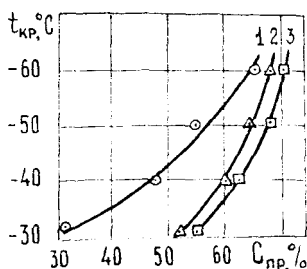


Рис. 4. Зависимость температуры кристаллизации $t_{кр}$ водных растворов антифризов от концентрации $C_{пр}$ антиводокристаллизирующих присадок в водной фазе: 1 — метилцеллозольв; 2 — этилцеллозольв; 3 — ТГФ

довленную глубоко окисленными смолистыми соединениями. Разработаны и другие присадки.

Антиокислительные присадки повышают стабильность реактивных топлив при длительном хранении. Присутствие в топливе небольшого количества реакционноспособных веществ (фенолов, аминофенолов и др.), реагирующих с промежуточными реакционноспособными продуктами окисления, обрывает процесс окисления углеводородов, протекающий по схеме автокаталитических реакций.

За рубежом в реактивные топлива в количестве 0,001—0,004% добавляется 2,6-Ди-трет. бутил-4-метилфенол (нонол, топанол O) или смесь 2,4-Ди-трет. бутилфенола (65—80%), 2,4,6-Три-трет. бутилфенола (3—15%) и 2-Трет. бутилфенола (5—30%), относительная эффективность по периоду индукции (время, в течение которого топливо остается стабильным) соответственно равно 0,59, 0,30, 0,28 и 0,14 (за единицу принят индукционный период 300 мин.).

В отечественные топлива в количестве 0,004—0,008% добавляется фенол-*n*-аминофенол, плохо растворимый в топливах, и нонол (0,004—0,030%), неограниченно растворимый в топливах и нерастворимый в воде.

При добавлении в топлива Т-4 и JP-4 2-Метил-6-трет. бутилфенола в количестве 0,015% смолообразование уменьшается с 333 до 5,7 мг/100 мл топлива.

Для повышения эффективности антиокислительных присадок к ним добавляются дезактиваторы металлов, подавляющие каталитическое влияние ионов активных металлов: меди, железа, никеля, марганца. Например, к *n*-Бутиламинофенолу (0,0033%) добавляется дезактиватор меди дисалицилиден-1,2-пропандиамин (0,0013%).

Антикоррозионные присадки (особенно в топливах из сернистых нефтей с повышенным содержанием меркаптановой серы) предотвращают коррозию деталей агрегатов топливных систем, складского и транспортного оборудования, образование агрессивных продуктов в топливе, нейтрализуют органические кислоты и подобные агрессивные компоненты топлив и образуют защитные пленки на поверхности металлов. К таким веществам относятся алифатические, ароматические соединения и оксиаммины, алкилфенолы и др. Наиболее эффективны присадки, составной частью молекул которых являются атомы серы и азота, например, N, N-Ди-этил-2-бензотиазолсульфенамид. Добавление последней (0,0056%) в топливо, содержащее до 0,05% меркаптанов, предотвращает коррозию меди. К ингибиторам коррозии железа можно отнести диэтилтиомочевину ((C₂H₅)₂N—CS—H₂), добавляемую в количестве 0,025%, и др.

Большое количество антикоррозионных присадок выпускается за рубежом. Например, Сантолейн С (димеры линолевой кислоты), добавляемая в количестве 11—45 мг/л, предотвращает электрохимическую коррозию железнодорожных цистерн, складских резервуаров, стальных трубопроводов и т. п.

Антиэлектростатические присадки повышают электропроводность топлив, что способствует предотвращению накопления статического электричества в топливных баках и магистралях.

В КИИГА на основе алкилсалицилатов хрома синтезирована присадка АСХ, при введении которой в топлива Т-1, ТС-1 и Т-7 в количестве 0,001% снижается их электризуемость в 2,5—8,5 раза. Более эффективна присадка АСА-3 фирмы «Шелл» — при добавлении ее в количестве 0,0001% электризуемость снижается в 2,6—9,1 раза, однако в процессе транспортировки и хранения присадка теряет свои свойства и отрицательно воздействует на топливную аппаратуру. АСА-3 состоит из смеси равных количеств хромовых солей моно- и диалкилсалициловых кислот с кальциевой солью сульфированного эфира янтарной кислоты и 2-Этилгексилового спирта. До 40% в ее составе сополимера метакрилатов лаурилостеаринового спирта и винилпиридина.

Противоизносные присадки усиливают действие природных поверхностно-активных веществ в топливах, что повышает смазывающую способность реактивных топлив.

Лучшими отечественными присадками являются ТП и К. Последняя используется при производстве топлива РТ. Противозносные свойства топлива Т-7 при введении присадки К улучшаются в 1,1 раза по сравнению с тем же количеством присадки Сантолейн С (США).

Антинагарные присадки предотвращают образование нагара в камерах сгорания реактивных двигателей. При добавлении в топливо 0,05% дициклопентадиенилжелеза нагарообразование снижается на 75%.

За рубежом используется ацетилацетонат железа и др.

С целью уменьшения дымления двигателей в топливо предлагается добавлять 0,2—2,0% смеси эфиров гидрохинона, изопропилового и диацетонового спиртов.

Полифункциональные присадки предназначены для одновременного улучшения нескольких эксплуатационных свойств топлив.

Наиболее распространенная присадка в нашей стране изопропилоктадециламин (ТП) повышает [10, 14, 23] термоокислительную стабильность топлив при температуре 100—250°С, улучшает противозносные свойства (при добавлении 0,01% веса доводит топлива Т-7 и Т-2 почти до уровня Т-1 — коэффициент трения уменьшается с 0,809 до 0,410), снижает коррозионную

агрессивность, предотвращает образование отложений на бронзовых деталях, обладает антиводокристаллизующими свойствами, но, в отличие от жидкости И или ТГФ, не растворяет образовавшиеся кристаллы инея.

В настоящее время эта присадка прошла лабораторные, стендовые и летные испытания и является эталонной при создании новых образцов полифункциональных присадок по эффективности.

2.4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ВРД

Создание перспективных топлив обусловлено растущими требованиями, предъявляемыми современной авиационной техникой, и ограниченностью сырьевых запасов Земли. Эта работа идет в направлении улучшения показателей применяемых углеводородных топлив, синтеза углеводородов, использования металлоорганических соединений, применения металлов в качестве топлива или его компонентов, разработки методов использования ядерной энергии.

Улучшение показателей эксплуатируемых сортов топлив определяется подбором сырья, совершенствованием технологии его переработки и использованием полифункциональных высокоэффективных присадок.

Для сверхзвуковых самолетов разрабатываются деароматизированные топлива, обладающие высокой термической стабильностью (особенно при введении в них 0,01% топанола). В США такое топливо имеет марку *Jp-X*; в Англии — «Шеллдин»; во Франции — «Карбожет». Энергетические свойства такого топлива на 2,4% лучше, чем у Т-1, принятого за эталон.

Синтезированные углеводороды, например из группы алкилбронзовых дициклогексила, по энергетическим показателям на 12—13% лучше керосинов типа Т-1, имеют большее люминиметрическое число, высокую термостабильность и хорошие низкотемпературные свойства. Топлива на основе спирановых углеводородов с высокой плотностью (до 990 кг/м³) по энергетическим показателям на 13—20% лучше применяемых, обладают высокой термической стабильностью и сгорают без образования дыма и нагара.

В настоящее время обсуждается возможность и проводятся испытания по применению криогенных топлив, особенно для сверхзвуковых самолетов с $M > 2,5$. Жидкий водород вследствие высокой стоимости и низкой температуры кипения ($-252,6^{\circ}\text{C}$) пока представляет меньший интерес для ЛА, чем сжиженный метан или природный газ, содержащий 60—99% CH_4 . Это топливо по сравнению с керосином обладает рядом преимуществ.

ществ; теплота сгорания больше на 12—14% и на столько же меньше расход; полезная нагрузка ЛА может быть увеличена на 30% и при этом на 30—35% снижаются прямые эксплуатационные расходы; метан обладает лучшей охлаждающей способностью — снимает от нагретого тела в 3—6 раз больше тепла по сравнению с керосином (при охлаждении лопаток турбины возможно увеличение T_3 до 1550°C). К недостаткам относятся: увеличение объема баков на 60% и их веса на 75—80% за счет теплоизоляции; потери через дренажную систему могут достигать 70%; сложность наземного оборудования для хранения и заправки ЛА; большая длительность заправки.

Из металлоорганических топлив наиболее интересными являются бороводороды: пентоборан (B_5H_9), с теплотой сгорания в 1,5 раза большей, чем у обычных керосинов, хорошо растворяется в углеводородах, обладает высокой скоростью горения, ядовит — поражает центральную нервную систему; декаборан ($B_{10}H_{14}$) — твердое вещество с идентичными характеристиками. Оба топлива увеличивают дальность полета на 40% и высоту. Производство топлива на основе бериллия более сложно.

Проводятся эксперименты с коллоидными растворами металлов (магний, алюминий, бор, измельченные до размеров частиц, равных 1 мкм) в углеводородах. Магний-углеводородные суспензии (4—6% магния в керосине) увеличивают тягу на 70%, а при впрыске воды — на 200%.

3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ

3.1. СТАБИЛЬНОСТЬ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ

Физико-химические свойства реактивных топлив условно делятся на эксплуатационные и контрольные. Эксплуатационные свойства характеризуют топлива с точки зрения возможности их применения для различных двигателей в тех или иных условиях. По контрольным свойствам, являющимся дополнительными к эксплуатационным, судят об идентичности партий топлива.

Под стабильностью понимается способность топлив сохранять свои свойства в условиях хранения и эксплуатации.

С момента производства топлив до их применения в ЛА проходит значительное время, необходимое для транспортировки в пункт назначения и создания определенных запасов на базах ГСМ.

Условия и сроки хранения топлив, правила транспортировки строго регламентируются соответствующими документами, поскольку они, с учетом длительного времени транспортировки и хранения, приводят к изменениям их первоначального состава и свойств.

В эксплуатации стабильность рассматривается в трех характерных условиях: а) при длительном хранении на складах ГСМ; б) в топливной системе дозвуковых самолетов; в) при высоких температурах (в топливной системе сверхзвуковых самолетов).

3.1.1. Стабильность топлив в условиях длительного хранения

При длительном хранении и транспортировке под действием кислорода воздуха, металлов, света, тепла, воды, наличия неуглеводородных примесей и других факторов парафиновые и нафтеновые углеводороды в жидкой фазе способны окисляться с образованием в большей степени спиртов, кислот и других продуктов; смолистые вещества, жидкие и твердые осадки в основном образуются при окислении ароматических углеводородов, другими словами, процессы окисления, полимеризации

и уплотнения (смолообразования) составных частей нефтяных топлив являются проявлением их нестабильности.

В южных районах и в наземных емкостях эти процессы ускоряются особенно в летнее время.

На смолообразование оказывают влияние условия заполнения емкости, что объясняется наличием кислорода и его количеством в надтопливном пространстве. Из рис. 5 видно, что при заполнении емкости на 50% через 5 месяцев накапливается в 3—3,5 раза больше смол, чем в случае полностью заполненного бака. Здесь же видно смолообразование в зависимости от сроков хранения.

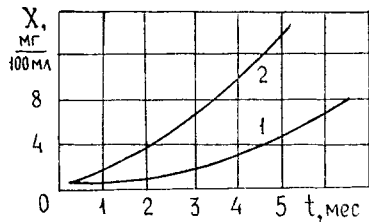


Рис. 5. Зависимость смолообразования от времени хранения топлива в полностью заполненной емкости (1) и в емкости, заполненной наполовину (2)

Ряд металлов, с которыми контактирует топливо при транспортировке и хранении, являются катализаторами окисления и смолообразования. Наиболее сильными являются цветные металлы: свинец, цинк, алюминий, медь (рис. 6).

Вода, находящаяся в топливе, ускоряет процессы окисления и смолообразования, особенно в присутствии катализаторов.

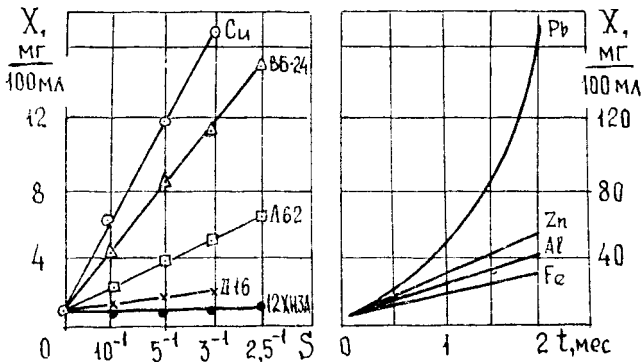


Рис. 6. Каталитическое действие металлов в условиях хранения топлива: левый график — влияние отношения поверхности металла к объему топлива (S , $\text{см}^2/\text{см}^3$) на образование осадков (керосин ТС-1 при 150°C); правый — влияние времени контакта (1) на образование осадков (керосин ТС-1 при 20°C)

Окисление углеводородов и неуглеводородных примесей топлива приводит к образованию сложной смеси кислородных соединений различного строения и молекулярного веса, большая часть которых оказывает отрицательное влияние на эксплуатационные свойства топлив.

В реактивных топливах прямой перегонки кислородных соединений (не смол) содержится до 0,3% веса. В топливах из сернистых нефтей преобладают окисленные сернистые соединения. Азотистые соединения (их около 0,05% веса) в контакте с кислородом при повышенных температурах подвержены окислительному уплотнению, т. е. превращению в смолы. Однако такие топлива могут храниться длительное время.

Топлива, содержащие продукты термического крекинга, за счет наличия непредельных соединений, легко образующих смолы, быстро изменяют свои свойства.

Продукты окисления углеводородов (в гидрированных, гидроочищенных топливах) хорошо растворяются в углеводородной среде, не нарушая гомогенности топлива, т. е. пропускаются фильтрующими элементами, не вызывая их закупорки.

Процессы окисления и внешнее загрязнение приводят к появлению в топливе твердых микрозагрязнений. Мелкие частицы (до 5 мкм) длительное время находятся во взвешенном состоянии, остальные оседают на дно и стенки резервуара.

Микрозагрязнения состоят из органических и минеральных соединений и воды. В них много углерода, водорода, серы, азота, кислорода и зольных элементов: железа, кремния и др. Большинство таких частиц проходит через фильтр тонкой очистки.

В чистом топливе содержится 0,5—1,5 г/т микрозагрязнений. После длительного хранения (5—6 месяцев) в железных резервуарах это количество увеличивается до 3—5 г/т, а при перемешивании и наличии воды — до 10—20 г/т. Это говорит о том, что после хранения на складах ГСМ топливо обязательно фильтруется.

Содержащиеся и вновь образующиеся смолы (фактические смолы) находятся в топливе в растворенном виде до определенной концентрации, после чего часть их выпадает в осадок, откладываясь на стенках баков, трубопроводов и агрегатов. При этом происходит забивка фильтров, зависание золотников, уменьшение проходных сечений трубопроводов и форсунок. Под действием высоких температур смолы превращаются в углистые лакоподобные пленки.

Склонность топлив к смолообразованию характеризуется индукционным периодом. В лабораторных ускоренных испытаниях этот период измеряется минутами, в естественных условиях хранения — месяцами. Топливо может храниться и использоваться

только в течение индукционного периода, на который основное влияние оказывает химический состав топлив и внешние факторы: температура, контакт с кислородом и металлами и др.

Предельные сроки хранения керосинов в закрытой таре — 3—5 лет (для южного и северного климатических поясов соответственно).

3.1.2. Изменение стабильности топлива в топливных системах дозвуковых самолетов

В топливных системах дозвуковых самолетов температура топлива повышается на 15—20°C в топливных насосах и на 20—30°C в топливомасляных радиаторах. Поэтому на температуру топлива, находящегося в топливной системе, большое влияние оказывает его начальная температура, высота и длительность полета.

Анализ состава отложений в виде тонкой маслянистой пленки, снятой с фильтра, указывает на присутствие в осадке мыл нафтеновых кислот. Особенно быстро происходит забивка фильтров при работе с топливом, из которого после щелочной очистки не полностью удалены натровые соли органических кислот (они называются нафтеновыми мылами — соединения типа RCOONa).

Следы не удаленной из топлива свободной щелочи, выделившейся при гидролизе натровых солей органических кислот, вызывают коррозию металлов, особенно алюминия, цинка, свинца, олова и их сплавов (в том числе и припой на трубках ТМР).

В трубках ТМР, изготовленных из каталитически активных сплавов, при наличии растворенного в топливе кислорода протекают процессы окисления и осмоления наиболее нестабильных соединений топлива. Теплопроводность этих продуктов низка. Часть их забивает фильтры тонкой очистки.

Отложения по топливной полости ТМР после длительной наработки распределяются следующим образом (рис. 7): в зоне входа топлива (наиболее охлаждаемый участок) количество отложений в 1,3 раза меньше, чем в зоне выхода (наиболее нагретый участок). В состав отложений входит до 31% меди и до 12% железа. Это говорит о том, что в образовании их значительную роль играет коррозия металлов. Коррозия усиливается сернистыми соединениями и продуктами их окисления.

В эксперименте при замене латунных трубок на стальные (рис. 8) средняя скорость накопления отложений за 1000 часов эксплуатации в ТМР с теплонапряженным режимом работы равна 17 мг/ч (с латунными — 59 мг/ч). Общее количество отложений на 1 м² стальных трубок в 5 раз меньше. При этом изменился и состав отложений в сторону преобладания железа,

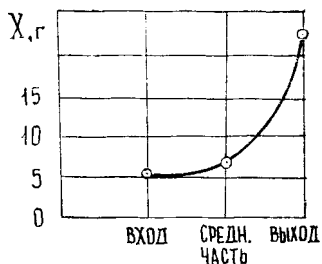


Рис. 7. Распределение отложений в топливной полости ТМР через 1000 ч парабтки

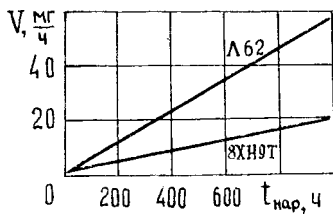


Рис. 8. Скорость накопления отложений на латунных (Л62) и стальных (8ХН9Т) трубах ТМР за 1000 ч парабтки

а не меди. Такие отложения легче удаляются. Замена трубок на стальные приводит к увеличению ресурса работы ТМР и топливных фильтров тонкой очистки.

3.1.3. Изменение стабильности топлив при высоких температурах

В связи с увеличением скорости полета до 2400—3600 км/ч температура самолета может достигать 120—330°C, что приводит к нагреву топлива до 100—150°C. Кроме того, топливо нагревается в насосах, теплообменниках и др. Поэтому современные реактивные топлива должны обладать термоокислительной стабильностью, т. е. сохранять свои свойства при температуре 150°C в течение 8—10 ч. Предполагается, что в дальнейшем эта температура поднимается до 250—300°C.

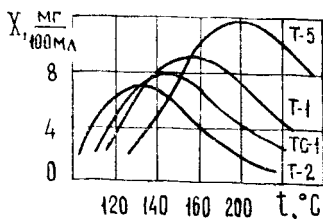


Рис. 9. Зависимость количества образующихся осадков от температуры для различных керосинов

Проведенные исследования [1,23] показали, что почти у всех топлив максимум образования осадка наблюдается при температурах 130—200°C (рис. 9). При более высокой температуре топливо усиленно испаряется и кипит, что приводит к интенсивному выделению кислорода из реакционной зоны, и процессы окисления затухают. Следует отметить, что с уменьшением вязкости (с ростом температуры) и увеличением числа возможных

соударений образующихся частиц происходит их заметное укрупнение: для топлив Т-1 и ТС-1 при температуре 120°C размер частиц меньше 50 мкм; при повышении температуры более 150°C

появляются частицы размером 50—120 мкм. Одновременно с увеличением температуры изменяется химический состав образующихся осадков: повышается содержание органических смолистых соединений, уменьшается количество зольной части.

При заполнении надтопливного пространства баков инертным газом (азот, углекислый газ) осадки в топливе не образуются при нагреве его до 120—250°C. Наличие в реактивных топливах микрозагрязнений снижает их термическую стабильность.

3.2. ФИЛЬТРАЦИЯ И ОЧИСТКА ТОПЛИВ

В топливах, заправляемых в ЛА, допускается содержание воды и механических примесей в таких количествах, которые не оказывают влияния на работу топливной системы (особенно топливорегулирующей аппаратуры, имеющей минимальные зазоры в сопряженных парах насосов высокого давления и золотников системы автоматики топливной системы, не превышающие 5—8 мкм).

Удаление из жидкости механических примесей производится двумя способами (физические методы очистки) [5, 6, 11, 17, 26] — пропусканием жидкости через пористые материалы — фильтрацией, пропусканием жидкости через различные силовые поля — очисткой.

3.2.1. Фильтрация топлив

Фильтры удаляют из жидкости частицы любого происхождения, если их размеры больше размеров пор фильтрующего материала. В качестве такого материала используются металлические сетки, ткани, бумага, керамика.

В топливной системе ЛА в основном применяются проволочные сетчатые фильтры, выполненные квадратным (простым) или саржевым плетением. При простом плетении каждая продольная проволока основы переплетается с каждой проволокой утка. При саржевом — проволока основы переплетается через две проволоки утка или поочередно через две и через одну проволоку утка. Лучшая фильтрация будет, если все проволоки утка расположены вплотную. Плющенные сетки имеют лучшую точность очистки.

Для обеспечения надежной работы топливорегулирующей аппаратуры и двигателей фильтры должны снижать количество частиц размером 1—2 мкм и не пропускать частицы размером более 5 мкм. Частицы такого размера называются микрозагрязнениями. От механических примесей (частиц размером более 40—50 мкм) микрозагрязнения отличаются составом. Помимо твердых соединений с зольными элементами, в них входят смолы, вода и сухие остатки растительного мира, попадающие

в топливо из атмосферы. К опасным загрязнениям относятся мыла нафтеновых кислот (RCOONa), забивающие топливные фильтры и увеличивающие коррозию деталей из сплавов алюминия, цинка, свинца и олова. Последние попадают в топливо при его получении на нефтеперерабатывающих заводах.

На складах ГСМ средней климатической зоны количество микрозагрязнений (со средним размером частиц 20—30 мкм) достигает 1,8—5,5 г/т, в южной климатической зоне 4,8—29,0 г/т. В топливных базах ЛА их количество в 2—7 раз больше. В топливной системе ЛА должно быть не более 1,2 г/т частиц размером 1—2 мкм.

Характеристикой засоренности фильтра является изменение перепада давлений на входе и выходе:

$$\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}} = Q \mu / kF = \mu V_{\text{усл}} / k,$$

где Q — расход;

μ — динамическая вязкость;

k — удельная пропускная способность фильтра;

F — площадь поверхности фильтра ($F = Q/V_{\text{усл}}$);

$V_{\text{усл}}$ — условная скорость движения топлива через фильтр, равная 0,003—0,006 м/с.

Началом забивки фильтра считается перепад $\Delta P = 130$ кПа, полной забивкой — 470 кПа.

Постоянным и нежелательным компонентом микрозагрязнений является вода, количество которой по нормам ИКАО не должно быть более 0,003% (свободная вода).

Отделение воды способом фильтрации осуществляется следующим образом. Капельки воды, проходя с топливом через фильтры из ткани, бумаги, фетра, силами поверхностного натяжения удерживаются на волокнах материала, сливаются в более крупные капли и под действием силы тяжести сливаются в отстойник. Таким образом происходит самоочистка фильтра. К таким устройствам относятся фильтры-сепараторы СТ-500-2, СТ-500-3, СТ-2000 и др.

В настоящее время в условиях эксплуатации существует многоступенчатая система фильтрации, обусловленная постоянным засорением топлива атмосферной пылью, продуктами коррозии трубопроводов и баков, процессами непрерывного окисления.

Первая ступень: топливо из транспортных средств сливают в резервуары базы ГСМ с тонкостью очистки 20—40 мкм (фильтры типа ФГН-120).

Вторая ступень: при перекачке топлива в топливозаправщики производят фильтрацию с тонкостью очистки 5—10 мкм (фильтры-сепараторы типа СТ).

Третья ступень: заправку баков ЛА осуществляют через фильтры с тонкостью очистки 5—7 мкм (фильтры ТФ-2М с фильтрующими пакетами ТФБ).

Последней ступенью являются фильтры топливной системы ЛА и двигателя.

Для сохранения топлив в чистоте внутренние стенки трубопроводов и баков защищают антикоррозионными покрытиями, обеспечивают тонкость фильтрации до 5 мкм; сепараторами или продувкой азотом отделяют воду; применяют герметичное хранение топлив, закрытый слив и выдачу для ограничения контакта с кислородом воздуха. К профилактическим мероприятиям относятся поплавковые устройства для верхнего забора топлива из резервуаров емкостью более 100 м³ и заправка ЛА под давлением снизу.

3.2.2. Очистка топлив

К очистителям, в которых используются гравитационные, центробежные, магнитные и электрические поля, относятся: отстойники, центрифуги, воздухоотделители, магнитные очистители, электрические — с очисткой в электрическом статическом поле.

а) Самым простым способом является отстаивание воды и механических примесей. Скорость оседания капель воды определяется выражением

$$V_{\text{в}} = \frac{gd^2}{6\nu_{\text{т}}} \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}} \frac{\nu_{\text{т}} - \nu_{\text{в}}}{3\nu_{\text{т}} + 2\nu_{\text{в}}},$$

где $\nu_{\text{т,в}}$ — соответственно кинематическая вязкость топлива и воды, м²/с;

d — диаметр капли, м.

Скорость осаждения твердых частиц подсчитывается по формуле

$$V_{\text{ч}} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\nu_{\text{ж}}} d^2,$$

где $d_{\text{э}}$ — эквивалентный диаметр частиц, учитывающий различие их формы от шарообразной.

Оба выражения показывают, что скорость оседания определяется разностью плотностей оседающих частиц и жидкости, размером частиц и вязкостью жидкости.

Время, необходимое для полного осаждения частиц диаметром $d_{\text{э}}$, в обоих случаях $\tau_{\text{maxoc}} = H/V_{\text{в,ч}}$, где H — максимальная высота уровня в отстойнике.

Практически нормы времени на отстаивание бензинов 1 ч и керосинов 4 ч на каждый метр высоты уровня в вертикальном резервуаре.

б) Скорость осаждения частиц можно увеличить воздействием на жидкость центробежных сил. С ростом последних возрастают скорости движения частиц:

$$V_{\text{ч}} = \frac{d_{\text{з}}^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) \frac{R_2 + R_1}{2} (\Psi \cdot \omega_{\text{р}})^2}{18 g \nu_{\text{ж}}},$$

где R_2 и R_1 — наибольший и наименьший радиусы ротора центрифуги соответственно;

Ψ — коэффициент, учитывающий отставание угловой скорости частицы от угловой скорости ротора ($\Psi = 0,8 - 0,9$);

$\omega_{\text{р}}$ — угловая скорость ротора.

Время, необходимое для осаждения на ложе наиболее удаленных от него частиц,

$$\tau_{\text{max}} = 36 \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \frac{g \nu_{\text{ж}}}{d_{\text{з}}^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) (\Psi \cdot \omega_{\text{р}})^2}.$$

Полное осаждение частиц диаметром $d_{\text{з}}$ произойдет в случае, если $\tau_{\text{max}} > \tau_{\text{max oc}}$.

В поле действия центробежных сил топливо очищается не только от тяжелых частиц, но и от растворенного в нем воздуха. Такие устройства называются воздухоотделителями.

в) Магнитные очистители удаляют из жидкости некоторые частицы из сплавов на основе железа. Большинство металлов: медь и ее сплавы, алюминий, магний, стали аустенитного класса — не реагируют с магнитным полем. Однако магнитные очистители способствуют повышению надежности жидкостных систем.

г) Электроочистители освобождают от загрязнений жидкости, величина объемного электрического сопротивления которых не менее $1 \cdot 10^9$ Ом. К ним относятся гидравлические и моторные масла на нефтяной и синтетической основе, дизельные топлива и керосины.

Очистители удерживают практически все частицы загрязнений, величина диэлектрической проницаемости которых отличается от аналогичной характеристики жидкости: продукты износа и коррозии металлов, атмосферная пыль, притирочные пасты, вода, капли смолы (адсорбирующие продукты износа) и др.

Оседание частиц на электродах происходит в том случае, когда кулоновская сила $F = qE$ (где q — заряд частицы; E — напряженность электрического поля) больше силы гидравлического сопротивления.

3.3. ПРОКАЧИВАЕМОСТЬ ТОПЛИВ

Под прокачиваемостью топлив понимается комплекс его физико-химических и эксплуатационных свойств, определяющих процесс перекачки по трубопроводам и агрегатам топливной системы.

Нарушения в подаче топлива, обусловленные его неудовлетворительными эксплуатационными свойствами, происходят в различных условиях эксплуатации при изменении температуры, влажности воздуха, при быстром изменении давления в топливной системе или надтопливном пространстве баков. К основным факторам, оказывающим влияние на прокачиваемость топлив, относятся:

наличие и образование в топливе твердых частиц, нерастворимых осадков и смол, забивающих фильтры и оседающих на стенках трубопроводов;

наличие и количество поверхностно-активных веществ, энергетически взаимодействующих с металлической сеткой фильтров и, тем самым, уменьшающих прокачиваемость топлив независимо от других их свойств;

pH среды — слабощелочная среда ($pH > 7$), энергетически не взаимодействует с сеткой фильтра;

возникновение кавитации и паровых пробок в топливной системе, особенно на больших высотах и при больших скоростях течения;

вязкость, зависящая в основном от фракционного состава, наличия примесей и температуры топлива.

3.3.1. Прокачиваемость топлив при низких температурах

Нарушение прокачиваемости обусловлено кристаллизацией углеводородов, воды, находящейся в топливе, и чрезмерным повышением его вязкости.

а) Температура кристаллизации углеводородов зависит от их химического строения и молекулярного веса. Исследования показали, что большинство углеводородов, выкипающих до 200°C , имеют температуру кристаллизации ниже -60°C и могут использоваться для получения реактивных топлив.

Из углеводородов, выкипающих при температуре выше 200°C , рекомендуется использовать парафиновые углеводороды изомерного строения (алканы — $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$), моноциклические с короткими разветвленными боковыми цепями и др.

Для снижения температуры начала кристаллизации из топлив удаляют высокомолекулярные парафины и некоторые ароматические углеводороды (бензол, *n*-ксилол), имеющие температуру кристаллизации $+5 \div +18^{\circ}\text{C}$.

В последние годы появились работы, показывающие целесообразность эксплуатации топлив с более высокими (примерно —50°C) температурами начала кристаллизации.

б) Керосины обладают обратной гигроскопичностью, т. е. способностью растворять и выделять воду при изменении температуры, относительной влажности воздуха и давления.

Растворимость воды в топливе при постоянной температуре пропорциональна давлению или относительной влажности воздуха;

$$c_{H_2O} = c_{\max} \frac{P}{P_{\Pi}} = c_{\max} \varphi,$$

где c_{\max} — максимально возможная концентрация воды в топливе, г/л;

φ — относительная влажность;

P_{Π} — давление насыщенных паров.

Зависимость концентрации воды, содержащейся в топливе, от температуры, показана на рис. 10 [14].

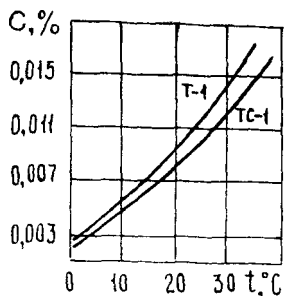


Рис. 10. Зависимость концентрации воды в топливах Т-1 и ТС-1 от температуры

Вода в реактивных топливах может находиться в трех видах: в свободном состоянии, в растворенном виде и в виде водно-топливной эмульсии.

В обычных условиях в топливе содержится до 0,005% воды. Свободная вода легко обнаруживается визуально и удаляется из топливных баков ЛА при сливе отстоя перед каждым полетом.

Растворенная вода выделяется из топлива при температуре ниже 0°C и быстро замерзает по всему объему, образуя мелкие кристаллы льда, находящиеся во взвешенном состоянии.

Часть выделяющейся из топлива растворенной воды переходит в эмульсионное состояние.

Водно-топливные эмульсии образуются во время перевозки топлива наземным транспортом, в топливных баках ЛА при перекачке обводненного топлива и в полете. Размер капель 10—40 мкм, но может быть и 1000 мкм. Для образования эмульсий в топливе необходимо присутствие поверхностно-активных веществ (смолистых образований и мыл нефтяных кислот), образующих защитные пленки на поверхности капель, препятствующие их слиянию.

Главная опасность эмульсионной воды — в ее способности вызывать обмерзание топливных фильтров. С понижением тем-

температуры топлива эмульсионная вода охлаждается с небольшим опозданием (табл. 5).

Таблица 5

Скорость охлаждения воды в зависимости от диаметра капель

Диаметр капель, мкм	Скорость охлаждения капель, с		
	Пределы температуры охлаждения, °С		
	от 0 до -5	от 0 до -10	от 0 до -15
10	14	28	42
500	70	139	200

Капли воды могут находиться в переохлажденном состоянии (табл. 6)

Таблица 6

Минимально возможная температура капель эмульсионной воды

Диаметр капель, мкм	10	50	100	300	1000
Минимальная температура, °С	-41	-36	-30	-28	-22

При встрече с сеткой фильтра капли превращаются в лед. В первую очередь обмерзают сетки фильтров грубой очистки с размером ячейки около 100 мкм.

Добавление в топливо жидкости И или ТГФ приводит к образованию эмульсии антифриза с керосином (поскольку часть присадки смешивается с водой), чем предотвращается опасность обмерзания фильтров.

Менее эффективным средством предохранения фильтров от обмерзания является предварительное вымораживание топлива. Процесс заключается в выдерживании топлива в течение 3-х суток (не менее) при температуре -10°C с последующей фильтрацией.

в) С понижением температуры топлива увеличиваются его плотность и вязкость. Зависимость вязкости топлива от температуры описывается выражением Вальтера:

$$\lg \lg (\nu + 0,8) = A - B \lg T,$$

где ν — кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

A, B — постоянные.

Графическая зависимость изменения вязкости топлив от температуры показана на рис. 11 [1].

Увеличение вязкости топлива, прокачиваемого по топливной системе, приводит к росту гидравлического сопротивления:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{d_3} \rho \frac{V^2}{2g},$$

где $\lambda = \frac{64 \nu}{d_3 V}$ — в случае ламинарного потока;

$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt{\text{Re}}}$ — турбулентный поток;

L — длина трубопровода;

V — скорость перекачки;

d_3 — эквивалентный диаметр трубопровода ($4d$: периметр).

Увеличение гидравлического сопротивления может привести к разрыву струи топлива и перебоям в подаче его в камеру сгорания двигателя.

Вязкость применяемых в настоящее время керосинов при температуре -40°C составляет 5—7 сСт, что не отражается на перекачке, фильтрации и распыливании его форсунками.

По данным летных испытаний самолетов с ГТД при полетах на больших высотах продолжительностью до 5 ч минимально возможная температура в баках-кессонах не опускается ниже -45°C , а в мягких ниже -28°C . На рис. 12 приведена экспериментальная зависимость температуры топлива в баках самолетов от продолжительности полета.

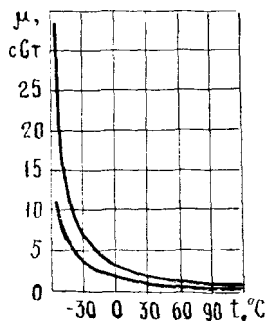


Рис. 11. Зависимость вязкости топлив от температуры

экспериментальная зависимость температуры топлива в баках самолетов от продолжительности полета.

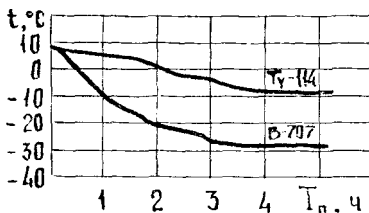


Рис. 12. Охлаждение топлива в баках самолетов в зависимости от продолжительности полета (Ту-114 — мягкие баки; В-707 — баки-кессоны. $T_{\text{нар}} = -60^\circ\text{C}$)

3.3.2. Прокачиваемость топлив при высоких температурах

В этом случае условия прокачивания топлива по системе питания обусловлены изменением его свойств вследствие нагрева

в топливных баках до температуры более 100°C при полетах на сверхзвуковых скоростях (плюс подогрев в насосах, теплообменниках и т. п.).

Нагрев топлива приводит к увеличению интенсивности процессов коррозии некоторых цветных металлов и сплавов, к образованию высокотемпературных осадков, смол, кислот, вызывающих закупорку фильтров, отложения на стенках баков, трубопроводах и агрегатах, т. е. в этом случае большую роль играют термостабильность и коррозионные свойства топлив.

С увеличением температуры топлива и высоты полета усиливается испаряемость и происходит интенсивное выделение из топлива растворенного в нем воздуха. При этом вероятность вскипания обусловлена прямой зависимостью давления насыщенных паров топлива от температуры.

В нормальных условиях растворимость воздуха в топливах увеличивается с уменьшением их поверхностного натяжения, увеличения давления и слабо зависит от температуры.

В бензинах растворяется 20—25 объемных процентов воздуха, в керосинах 13—15 и в смазочных маслах 7—11%, т. е. на каждые 1000 л топлива для ТРД с подъемом на высоту может выделиться до 150 л воздуха.

Выделение воздуха из топлива с поднятием на высоту несколько запаздывает, особенно при большой скороподъемности. Поэтому на высоте более 8000 м может произойти кратковременное вскипание топлива и перебой в питании двигателя из-за развивающейся кавитации.

Для уменьшения образования осадков при высоких температурах применяется насыщение топлива инертным газом, например, азотом; применяются и разрабатываются более эффективные антитермооксидные и антикоррозионные присадки; разрабатываются эффективные технологические способы получения и очистки топлив.

Уменьшение вероятности вскипания и интенсивности испарения топлив для сверхзвуковых полетов обеспечивается: использованием топлива с низким давлением насыщенных паров; охлаждением его перед полетом и созданием в топливных баках избыточного давления инертными газами.

3.4. ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ

Долговечность и надежность агрегатов топливных систем ЛА зависит, главным образом, от износостойкости многочисленных трущихся пар скольжения и качения, работающих в среде топлива.

Противоизносные свойства определяются как способность топлив снижать интенсивность износа деталей и агрегатов.

Главным и определяющим параметром противозносных свойств реактивных топлив является величина износа трущихся пар, в значительной степени определяемая поверхностной активностью, т. е. способностью топлива адсорбироваться на поверхности металла, предотвращая тем самым сухое трение.

Наиболее высокой поверхностной активностью обладают вещества, молекулы которых являются электрическими диполями. К ним относятся смолы, органические кислоты, кислородосодержащие соединения, сераорганические и азотоорганические соединения.

На противозносные свойства топлив большое влияние оказывают фракционный состав, вязкость и температура, а также механические примеси, вода, растворенные газы.

Молекулы углеводов обладают небольшим дипольным моментом, их противозносные свойства низкие.

Известно, что большое значение имеет поверхностная энергия металлов, определяемая работой выхода электронов — чем больше поверхностная энергия, тем больше износостойкость.

Топлива и масла, омывающие трущиеся поверхности, в некоторых случаях значительно изменяют работу выхода электронов и, соответственно, оказывают влияние на интенсивность износа. Было высказано предположение [25] о том, что значительные потенциалы и токи, возникающие в смазывающем слое, воздействуют на свободные электроны поверхностного слоя, осуществляющие когезионную связь положительных ионов в решетке кристалла. В результате прочность поверхностного слоя понижается.

При трении металлов в среде топлива (масла) одновременно протекает два процесса: образование и рост поверхностных пленок, представляющих собой окислы, сульфиды и усталостные разрушения образующихся пленок.

Кинетика образования и разрушения пленок описывается дифференциальным уравнением [9]

$$dS_{\text{пл}}/dt + R(t) S_{\text{пл}}(t) = Q(t),$$

где $R(t) = KV(t)$;

$$Q(t) = V(t) (KS_{\text{ф}} - a_1) - a_2 P(t);$$

$S_{\text{пл}}$ — площадь контакта двух трущихся пар, покрытая защитной пленкой;

k — коэффициент скорости пленкообразования;

$V(t)$ — скорость относительного скольжения сопряженных поверхностей;

$P(t)$ — нормальное давление в контакте;

$S_{\text{ф}}$ — площадь фактического контакта сопряженных металлических поверхностей ($S_{\text{ф}} \geq S_{\text{пл}}$).

Решение этого уравнения имеет вид

$$S_{\text{пл}} = \left[\int Q(t) \exp \left(\int R(t) dt \right) dt + c \right] \exp \left(- \int R(t) dt \right) = \int Q(t) dt + \frac{C}{\exp \int R(t) dt}$$

Уравнение показывает значительную зависимость кинетики образования и разрушения защитных пленок от скорости относительного скольжения $V(t)$, обуславливающей интенсивные электромагнитные и механические взаимодействия. Интенсивность износа в каждом конкретном случае определяется свойствами и толщиной образующихся поверхностных пленок и их усталостной долговечностью.

Основная трудность в познании физических закономерностей изнашивания материалов заключается в том, что свойства приповерхностных слоев отличаются от свойств основной массы материала под сильным воздействием внешних факторов (нагрузки, температуры, смазки, возникающих локальных электромагнитных полей и др.) с одновременным механическим воздействием сопряженной поверхности. Все это обуславливает подход к изнашиванию как к кумулятивному процессу, т. е. процессу, суммирующему действия отдельных факторов.

На рис. 13 [1] показана зависимость интенсивности износа от фракционного состава топлива. Исследования показали, что типы углеводородов, входящие в состав реактивных топлив, но противозначным свойствам распределяются следующим образом (от лучших): ароматические, нафтеновые, изопарафиновые и нормальные парафины. По фракциям — от тяжелых к легким. Противозначные свойства улучшаются при наличии в топливе непредель-

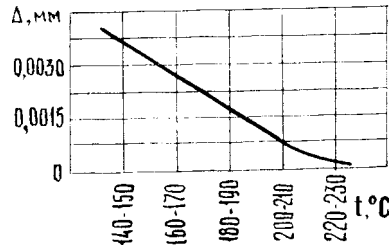


Рис. 13. Зависимость интенсивности износа Δ , мм от фракционного состава топлива T-I (от температурных пределов выкипания фракций, °C)

наличи в топливе непредель-

На рис. 14 и 15 показано влияние температуры и содержания растворенного кислорода (объемные %) на противозначные свойства топлив. Увеличение износа топливорегулирующей аппаратуры с повышением температуры топлива объясняется уменьшением его вязкости и усилением коррозионных и окислительных процессов. Смолистые отложения на поверхности трущихся металлов в этом случае ухудшают условия трения. Недо-

статочная термическая стабильность топлив способствует образованию подобных высокотемпературных осадков и появлению в топливе твердых микрозагрязнений различной дисперсности.

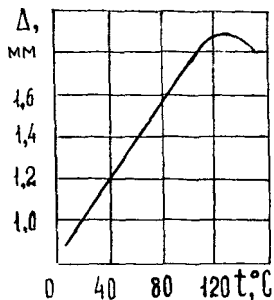


Рис. 14. Влияние температуры на противозносные свойства топлив

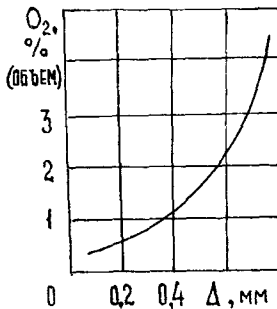


Рис. 15. Влияние содержания в топливе кислорода на износ трущихся пар

Опыт эксплуатации и результаты многих исследований, выполненных в КИИ ГА, показали особую роль в интенсификации процессов износа атомарного кислорода, активно действующего при различных температурах.

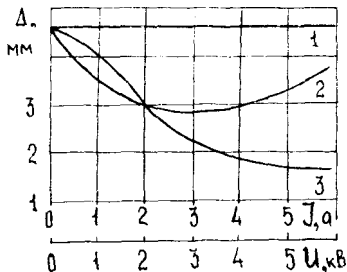


Рис. 16. Зависимость износа трущихся пар от условий обработки топлива Т-7: 1 — товарное топливо; 2 — обработка электростатическим полем; 3 — обработка магнитным полем (указан ток в катушке электромагнита). Режим работы узла трения: $n = 14,2$ 1/с; нагрузка $230 \cdot 10^7$ Н/м²; паработка $2 \cdot 10^5$ циклов; температура + 60°C; материал сталь ШХ-15

Большой интерес представляют работы КИИ ГА по изучению противозносных свойств керосинов (рис. 16), обработанных электрическими и магнитными полями.

Для улучшения противозносных свойств топлив применяются присадки, повышающие термическую стабильность — поверхностно-активные присадки ТП и П. После их добавки к марке топлива присоединяют эти буквы: Т-7ТП, Т-2П и т. п. Присадки добавляются в количестве 0,02% по весу.

Эффективными являются антиокислители и деактиваторы металлов, например, инол (2,6-Дитрет - бутил - 4-метилфенол) и др.

К другим мероприятиям, повышающим противозносные свойства топлив, относятся: снижение температуры топлив перед полетом; снижение содержания в топливе меркаптановой серы (до 0,001—0,003%); повышение вязкости топлив; повышение их термостабильности; повышение чистоты топлив.

3.5. КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВ

Под коррозионными свойствами подразумевают влияние свойств топлив в жидкой фазе или в виде продуктов сгорания на коррозию деталей топливной аппаратуры и двигателя. Различают два вида коррозии, наблюдаемые в процессе эксплуатации ЛА: жидкофазная коррозия агрегатов топливной системы и газовая высокотемпературная коррозия стенок камеры сгорания, деталей газовой турбины и выходного сопла.

В углеводородах реактивных топлив металлы не корродируют. К содержащимся в топливах агрессивным примесям относятся: эмульсионная вода и минеральные загрязнения; растворенный в топливе кислород; низкомолекулярные, растворимые в воде продукты окисления и распада молекул топлив (органические кислоты); сернистые соединения и продукты их термического распада и окисления (элементарная сера, серная кислота, сероводород, меркаптаны — соединения типа $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SH}$).

3.5.1. Жидкофазная коррозия

Вода, кислород, минеральные загрязнения и водорастворимые кислоты являются причиной главным образом электрохимической коррозии черных металлов. Коррозия проявляется в виде местных потемнений, отдельных пятен, ржавчины и мелких точечных повреждений поверхности металла. В топливе образуются коричневые хлопья гидроксиды железа, забивающие топливные фильтры, жиклеры, форсунки и заклинивающие плунжерные пары насосов. В товарном керосине на углеродистых сталях коррозия появляется на 7—20-е сутки, на легированных — через 15—75 суток.

Активные в химическом отношении сернистые соединения (элементарная сера, сероводород и меркаптаны) и органические кислоты химически взаимодействуют с бронзовыми и кадмированными деталями топливной аппаратуры, вызывая на первых появление коррозионных отложений черного цвета и студенистых образований на кадмированных деталях.

Исследования показали, что большая часть элементарной серы проникает вглубь сплавов меди, вступая во взаимодействие с его компонентами, что приводит к нарушению их первоначальной структуры. При температурах 120—150°C из топ-

лива вглубь бронзы проникает от 50 до 95% элементарной серы.

Студенистые отложения, образуемые главным образом меркаптанами, забивают проходные сечения форсунок, нарушают работу топливных регуляторов, забивают фильтры тонкой очистки.

Неактивные сернистые соединения (сульфиды — RSR , тиофаны — $\text{C}_4\text{H}_2\text{S}$ и др.) в жидкой фазе для металлических деталей не опасны.

Гидроочищенные топлива не вызывают коррозии цветных металлов даже при повышенной температуре.

3.5.2. Газовая высокотемпературная коррозия

При сгорании топлива, содержащего серу, в поршневом двигателе, в продуктах сгорания обнаруживается сернистый ангидрид (SO_2), который растворяется в воде, сконденсировавшейся на стенках цилиндров, образуя сернистую кислоту. Последняя вызывает интенсивную коррозию цилиндров, поршневых колец и других деталей.

При сгорании любых сернистых соединений в ТРД образуется сернистый газ (SO_2), вступающий при температурах выше 1000°C в реакцию с никелем, содержащимся в легированных сталях. Эвтектическая точка системы никель — сернистый никель (Ni_3S_2) приблизительно равна 650°C . Эти места интенсивно горят, вызывая разрушение деталей. Чем больше содержание серы, тем выше скорость коррозии и ниже температура, при которой она начинается.

Большое влияние на газовую коррозию оказывают содержащиеся в топливе некоторые металлы. Наиболее активными являются ванадий (V) и натрий (Na). Присутствие в топливе следов ванадия (0,00001—0,01) % приводит к интенсивной газовой коррозии сплавов железа. Механизм ванадиевой коррозии примерно такой: образующаяся после сгорания пентаокись ванадия V_2O_5 в жидком виде осаждается на металлической поверхности элементов газового тракта. Температура плавления пентаоксида ванадия 685°C . Благодаря переменной валентности ванадия пентаокись переходит в четырехокись: $\text{V}_2\text{O}_5 \rightarrow \text{V}_2\text{O}_4 + \text{O}$. Выделившийся атомарный кислород взаимодействует с железом. В газовом тракте при высокой температуре и наличии кислорода четырехокись регенерируется в пентаокись и процесс перекачки атомарного кислорода из смеси продуктов сгорания с воздухом в металл конструкции повторяется. Т. е. ванадий играет роль катализатора газовой коррозии.

Аналогично ведет себя молибден (Mo), образуя легкоплавкое соединение MoO_3 . Молибден попадает в топливо в процессе его

гидроочистки на $Al-Co-Mo$ или $Al-Ni-Mo$ катализаторах.

Разновидностью газовой коррозии является осповидное выветривание внутренних поверхностей жаровых труб, передних диффузоров головок камер сгорания и других элементов газового тракта, работающих при температурах не более $450^{\circ}C$ и имеющих контакт с топливоздушной смесью. Подобная низкотемпературная газовая коррозия в эксплуатации наблюдается на топливах Т-7, ТС-1 и Т-1, т. е. на гидроочищенных, с большим и малым содержанием серы и других активных в химическом отношении компонентов при наличии нагара. Поражение располагается участками от 1 до 5 см² глубиной от 0,2—0,3 мм до сквозных раковин. Это явление мало изучено.

3.6. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТОПЛИВ

Электризация — это комплекс физических и химических процессов, приводящих к пространственному разделению электрических зарядов или накоплению зарядов одного знака. Электризация жидкости происходит в том случае, когда ее удельное сопротивление больше 10^8 Ом/м. К таким жидкостям относятся топлива, масла и технические жидкости на основе углеводородов.

При движении топлив происходит накопление статического электричества. Топливо, как правило, приобретает положительный заряд. Интенсивность этого процесса зависит от геометрических размеров, материала топливной системы и физико-химических свойств топлив.

На границе раздела твердой и жидкой фазы (трубопровод, бак—топливо) образуется двойной электрический слой. Ионы одного знака уносятся потоком и накапливаются в жидкости.

Исследования, выполненные в КИИГА, показали, что при течи топлива по трубопроводу с малой скоростью толщина пограничного слоя превышает толщину двойного электрического слоя. В этом случае плотность зарядов мала. С увеличением скорости течения граница турбулентного ядра перемещается в область, занятую диффузно распределенным зарядом, и происходит увеличение плотности заряда. Чем больше толщина этого слоя и больше скорость движения жидкости, тем выше плотность заряда, уносимого потоком.

Увеличение содержания эмульсионной воды (более 0,006% вес.) приводит к уменьшению заряда в трубопроводе. Содержание воздуха, растворенного в топливе, в зависимости от размеров пузырьков интенсифицирует процессы образования и накопления зарядов. С увеличением температуры количество

образующихся зарядов увеличивается тем больше, чем хуже стабильность топлив. Аналогичный эффект наблюдается с увеличением сроков хранения топлив. При заправке баков самолета азотированным топливом содержание O_2 снижается до 15—16% (объемн.), и расход топлива по трубопроводу из условий его электризации может быть увеличен до 2000 л/мин и более при предельной скорости заправки в норме 1680 л/мин.

Одним из основных генераторов электростатических зарядов в топливе являются фильтры, дающие потенциалы приблизительно в три раза большие, чем трубопроводы.

Искровые разряды в надтопливном пространстве, образуясь в процессе релаксации больших электрических зарядов, возникают при напряженности поля 2000 В/см. При заправке самолета образуются местные поля напряженностью до 30000 В/см. Работа топливных насосов, интенсивное перемешивание топлива в баке при заправке или перекачке приводит к накоплению потенциала в тысячи вольт.

Величина генерируемых в трубопроводах зарядов определяется уравнением

$$Q = kV^m d^n (1 - e^{-l/vr}),$$

где V — скорость движения топлива по трубопроводу;

d — диаметр трубопровода;

r — время релаксации электростатических зарядов (величина, обратно пропорциональная проводимости топлива);

k, m, n — постоянные коэффициенты.

Степень электризации приблизительно пропорциональна скорости движения топлив в степени 3—4.

Электризация топлив осуществляется и при электризации самолета в результате трения его поверхности о воздух и, особенно, о частицы снега, пыли, дождевые капли, вследствие ионизации выхлопных газов и т. п. — при этом потенциал заряда достигает десятков тысяч вольт.

Эффективным методом снижения электризуемости топлив является введение в них антистатических присадок, повышающих их электропроводность и способствующих, тем самым, стеканию зарядов статического электричества.

К мероприятиям, снижающим электризуемость топлив и накопление зарядов, относятся: тщательное заземление перекачивающих средств, трубопроводов, баков; фильтрация топлив (особенно через тонкие фильтры) через металлические, обязательно заземленные сетки; минимально возможное перемешивание топлив с воздухом и механическими примесями; заполнение топливных систем с ограниченной скоростью движения топлива по трубопроводам.

3.7. ПУСКОВЫЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВ

В ВРД под пусковыми свойствами топлива подразумевается способность его к воспламенению от электрической искры и надежное поджигание основного потока топлива. К пусковым свойствам топлив предъявляется ряд требований: способность к воспламенению на высотах 10—25 км; способность к устойчивому горению в любых условиях полета ЛА и достаточная интенсивность горения в тех же условиях. Углеводородные топлива не обеспечивают выполнения этих требований. На высотах 10—12 км при температуре — 55°С и пониженных давлениях горение углеводородного топлива протекает вяло и дает так мало тепла, что не способно поджечь основное топливо.

Пусковые свойства топлива определяются сложным комплексом физико-химических и эксплуатационных свойств:

концентрационными пределами воспламенения;
минимальным предельным давлением топливовоздушной смеси;

минимальной энергией воспламенения;
периодом задержки воспламенения;
степенью дисперсности топливного факела;
температурой воспламенения;
температурой самовоспламенения;
летучестью топлива и другими свойствами.

Пусковые свойства топлив в большей степени определяют не только процессы воспламенения его при запуске двигателя, но и горение в камере сгорания, и пожарную безопасность ЛА. Некоторые из перечисленных свойств рассмотрены в разд. I.

3.7.1. Температура воспламенения топлив

Температура воспламенения — температура, при которой топливо, нагреваемое в установленных стандартом условиях, загорается при поднесении к нему открытого пламени или от электрической искры и горит не менее 5 с.

Условие воспламенения топлива можно записать в виде

$$\frac{VqE\omega_0}{S\alpha RT_n} e^{-\frac{E}{RT_n}} = 1,$$

где V — объем реакционного сосуда, см³;
 q — тепловой эффект реакции, кал/моль;
 E — энергия активации, кал/моль;
 ω_0 — коэффициент скорости химической реакции;
 S — поверхность теплопередачи, см²;
 α — коэффициент теплопередачи;
 R — газовая постоянная;
 T_n — температура воспламенения, К.

Из этого условия температура воспламенения не является физико-химической постоянной, а зависит от различных условий: объема и площади камеры сгорания, условий теплоотдачи и др.

3.7.2. Температура самовоспламенения топлив

Пусковые свойства топлив связаны еще с одной характеристикой — температурой самовоспламенения, которая, аналогично температуре воспламенения, не является физико-химической постоянной данного топлива.

По современным представлениям начальной фазе процесса окисления предшествует активация молекул окисляющего вещества, т. е. образование активных радикалов при разрыве наиболее слабых связей в молекуле. Возможно, что в этом случае действует цепной механизм, предложенный академиком Н. Н. Семеновым.

Согласно тепловой теории под температурой самовоспламенения понимают наибольшую температуру горючего вещества, при которой оно в смеси с воздухом способно самонагреться до возникновения горения.

Условия самовоспламенения связаны с выделением тепла от предпламенной реакции (левая часть уравнения, приведенного ниже) и отводом тепла в окружающую среду (правая часть уравнения) [13]:

$$Vq_{\omega_0} \geq S\alpha(T_1 - T_0),$$

где T_1 — температура реагирующего вещества.

При увеличении массы реагирующего вещества объем его возрастает пропорционально кубу радиуса, а поверхность теплопередачи — пропорционально квадрату радиуса реакционного объема. Поэтому при увеличении объема вещества будут складываться благоприятные условия для накопления тепла и самовоспламенения вещества.

Таким образом, температура самовоспламенения зависит от скорости тепловыделения, скорости теплоотвода, объема горючего вещества, его концентрации, давления, температуры и других факторов.

Эксперименты показали, что эта температура изменяется не только с увеличением или уменьшением объема горючего вещества, но и с изменением формы или размеров емкости, поскольку в этом случае изменяется удельная поверхность теплоотвода. Большая поверхность теплоотвода в крылевых баках, несмотря на повышенное содержание кислорода в надтопливном пространстве бака с поднятием на высоту, не способствует самовоспламенению. В этом отношении фюзеляжные баки значительно хуже.

3.7.3. Летучесть топлив

Летучесть топлив является характеристикой легкости их воспламенения и оценивается температурой, при которой выкипает 10% топлива, т. е. пусковые свойства топлив зависят от фракционного состава.

Для большинства реактивных топлив температура 10% отгона имеет величину 165—175°C. Чем ниже эта температура, тем легче запуск и меньше минимальный перепад давления на форсунках, обеспечивающий образование топливовоздушной смеси, способной гореть. Так [13], для широкофракционного керосина Т-2 температура выкипания 10% топлива равна 145°C и минимальное давление топлива для воспламенения $P_{\phi} = 2,5 \text{ кг/см}^2$. Для керосина РТ температура выкипания 10% равна 174°C и $P_{\phi} = 3,2 \text{ кг/см}^2$.

Топлива с хорошими пусковыми свойствами обеспечивают запуск реактивных двигателей на более бедных смесях. Например [14], топливо Т-2 обеспечивает запуск двигателя при оптимальном значении коэффициента избытка воздуха $\alpha = 5,8$, в то время как Т-1 — при $\alpha = 4,0$. На бензине с температурой выкипания 10% равной 70°C двигатель легко запускается при температуре окружающего воздуха —55°C. На топливе с температурой выкипания 10% 150—190°C запуск осложняется уже при —40°C.

3.7.4. Пожарная опасность

Испарение топлив создает условия возникновения пожара. Пары над топливом Т-1 взрывоопасны, если температура топлива не ниже 25—30°C; над топливом ТС-1 — не ниже 15—52°C; над топливом Т-2 — минус 10—20°C. При более низкой температуре топлива от внешнего источника не загораются, т. е. их температура будет ниже температуры воспламенения. Теоретически существует верхний температурный предел воспламенения: для Т-1 около 65°C, для ТС-1 55—60°C, для Т-2 40—45°C. В этом случае в надтопливном пространстве образуется чрезмерно богатая смесь. Эти пределы сближаются с поднятием на высоту.

Источником воспламенения могут быть повреждения отдельных участков электропроводки, разряды статического электричества. Опасными являются удары молнии, возможные на высотах от 0 до 12 км и особенно до 4,5 км. При этом воспламенение может произойти путем прямого зажигания паров топлива в заборнике дренажа при поперечном разряде в нем, путем прожигания стенки бака и созданием дугового разряда. В баках-кессонах из титановых сплавов молния создает местную

горячую точку (из-за плохой теплопроводности титана), воспламеняющую пары топлива по типу свечи с тлеющим разрядом.

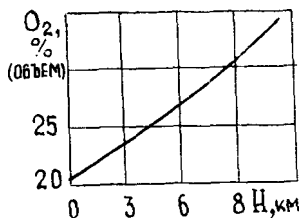


Рис. 17. Изменение концентрации O_2 в надтопливном пространстве баков с поднятием на высоту

Процессы воспламенения топлива в надтопливном пространстве баков усугубляются повышенным содержанием кислорода в нем с поднятием на высоту (рис. 17). Одновременно с выделением воздуха из топлива происходит большее выделение кислорода, чем азота, поскольку его растворимость в топливе выше. Например, при температуре $+15,5^\circ\text{C}$ коэффициент растворимости кислорода 0,0285, азота — 0,0157.

Состав смеси в надтопливном пространстве, без учета последнего эффекта, можно определить из уравнения Бойля-Мариотта при условии, что при $T = \text{const}$ PV :

$$c = \frac{P_n M}{P_{нт} V_t},$$

где c — концентрация топлива, г/л;

P_n — давление насыщенных паров;

M — количество топлива, численно равно молекулярному весу пара;

$P_{нт}$ — давление в надтопливном пространстве;

V_t — объем одного моля пара при данных условиях.

Зная объем надтопливного пространства $V_{нт}$ в баке, определяем возможное количество топлива в нем:

$$G_{тнт} = c V_{нт}.$$

Тогда

$$\alpha = G_{нт} / G_{нтL_0},$$

где L_0 — количество воздуха, теоретически необходимое для сгорания одного килограмма топлива.

Примерные пределы воспламенения углеводородных топлив по составу смеси лежат в пределах $1,4 > \alpha > 0,5$.

3.8. ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ТОПЛИВ НА НАГАРООБРАЗОВАНИЕ В ДВИГАТЕЛЕ

При сгорании углеводородных топлив наблюдается выделение дисперсных углистых частиц, являющихся продуктами неполного сгорания топлива. Часть их видна в виде дыма в вы-

хлопных газах, часть отлагается в виде нагара на форсунках, стенках камеры сгорания и других элементах газового тракта — в основном в застойных зонах.

Нагар представляет собой коксообразный продукт либо с кристаллической структурой, либо аморфный — сажистого типа. Его образование связано с жидкофазным крекингом топлива, последующего пиролиза его в трубопроводах высокого давления и форсунках и коксования части топлива, попавшего на горячую стенку камеры сгорания.

Отложение нагара влечет за собой изменение аэродинамики газового потока, качества смесеобразования, перегрев элементов газового тракта под слоем нагрева ввиду его плохой теплопроводности, эрозию турбины.

Склонность к нагарообразованию оценивается выражением [1]

$$W = \frac{\ln(C/H K_1 - K_2)}{K_3} + \frac{t_{10\%}}{K_4} - K_5,$$

где K_{1-5} — коэффициенты, зависящие от условий сгорания;

C — количество атомов углерода в теоретической формуле топлива;

H — количество атомов водорода в той же формуле;

$t_{10\%}$ — температура выкипания 10% топлива.

Для грубой оценки можно принять $K_1 = 0,83$; $K_2 = 1,5$; $K_3 = 0,54$; $K_4 = 0,54$; $K_5 = 3,0$.

Приведенное выражение показывает, что материалом для образования нагара в двигателе в первую очередь являются соединения с наименьшим относительным содержанием водорода в молекуле. Кроме того, на нагарообразование оказывает влияние летучесть топлив. Топлива с высокой плотностью обладают большей тенденцией к нагарообразованию.

На рис. 18—20 показано влияние температуры выкипания

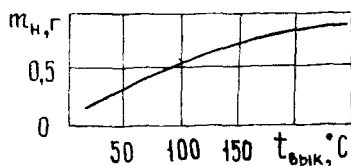


Рис. 18. Влияние температуры выкипания 10% ($t_{\text{вык}}$) топлива на образование нагара

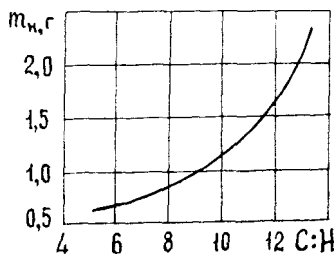


Рис. 19. Влияние содержания ароматических и непредельных углеводородов (отношение $C:H$) на образование нагара

10% топлив (летучести), среднего отношения С : Н в молекулах топлива и плотности топлив на нагарообразование в двигателе.

Показателем, оценивающим нагарообразующие свойства реактивных топлив, является высота некоптящего пламени (за рубежом этот показатель носит название «точка дымления»). Чем больше высота некоптящего пламени, тем меньше нагарообразующая способность (рис. 21) [23].

В некоторых случаях определяющим фактором в процессе нагарообразования являются условия эксплуатации. Например, в реактивных двигателях, установленных на скоростных самолетах, работающих на топливе Т-1 или ТС-1, откладывается в два раза меньше нагара, чем за то же время в однотипных двигателях, установленных на транспортных самолетах.

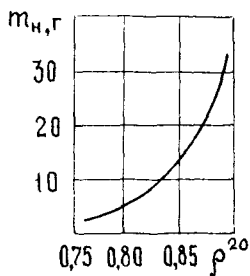


Рис. 20. Влияние плотности ρ^{20} топлива на образование нагара

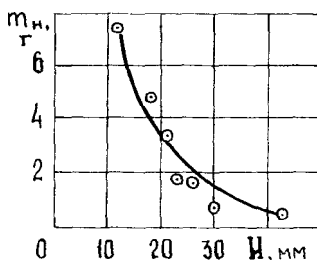


Рис. 21. Зависимость нагарообразования от высоты некоптящего пламени

Интенсивность отложения нагара на топливных форсунках зависит от отношения С : О в нагаре. Чем меньше это отношение ($\text{C} : \text{O} > 5$), тем больше нагара отлагается на форсунках в полете, поскольку повышенное содержание кислорода придает молекулам нагара большую поверхностную активность, повышенную их адсорбируемость на металлических поверхностях. Нагар с большим отношением С : О (< 27) плохо адсорбируется на поверхности металла.

Основными компонентами нагаров в двигателях скоростных самолетов являются углерод (75—85%) и кислород (8—21%); водорода содержится меньше 6%. На двигателях транспортных самолетов в нагаре содержится на 6—10% меньше углерода и примерно в два раза больше кислорода. Это объясняется тем, что двигатели скоростных самолетов работают на более высоких режимах.

3.9. ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ

Суммарный тепловой поток от газа в стенку жаровой трубы камеры сгорания и элементов турбины определяется конвективными и лучистым тепловыми потоками.

Конвективная теплоотдача продуктов сгорания от свойств топлив практически не зависит. Лучистая теплоотдача факела, не ослабляемая заградительным слоем воздуха в камере сгорания ВРД, обусловлена, в основном, сажиностью пламени и совместным излучением продуктов сгорания. Излучательная способность одноатомных газов мала настолько, что ее практически можно не учитывать. Существенную роль играют многоатомные газы, в том числе с преимущественным содержанием углерода.

Характеристикой теплового излучения (радиации) пламени является люцинометрическое число (ЛЧ). ЛЧ определяется на диффузной горелке, оборудованной фотоэлементом со светофильтром желто-зеленого цвета для регистрации светимости пламени и термопарой с потенциометром. В горелку заливается 10 мл испытуемого топлива и при разной высоте пламени определяется прирост его температуры и интенсивность свечения. По полученным данным строится графическая зависимость интенсивности излучения от Δt_T пламени. Аналогичные зависимости строятся для эталонных топлив — изooksтана ($\Delta t_{из}$, ЛЧ которого принимается за 100 единиц, и тетралина ($\Delta t_{тет}$; ЛЧ=0). Для последнего $\Delta t_{тет}$ определяется при высоте пламени, соответствующей началу дымления. По этой температуре для одного значения интенсивности свечения по графической зависимости определяются Δt изooksтана и испытуемого топлива. ЛЧ определяется по формуле

$$ЛЧ = \frac{\Delta t_T - \Delta t_{тет}}{\Delta t_{из} - \Delta t_{тет}}$$

Исследования показали, что чем меньше значение ЛЧ, тем больше плотность лучистой энергии факела и выше температура элементов конструкции камеры сгорания, турбины (рис. 22) [14]. Поэтому определение ЛЧ является существенным с точки зрения обеспечения усталостной прочности теплонапряженных элементов двигателя.

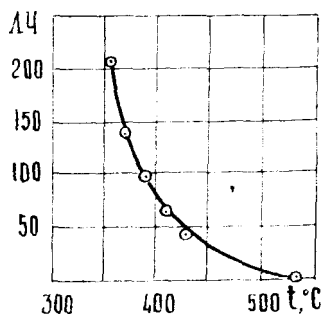


Рис. 22. Влияние люцинометрического числа ЛЧ на температуру стенки жаровой трубы ГТД

3.10. ПОТЕРИ ТОПЛИВА В ВЫСОТНЫХ УСЛОВИЯХ

Потери топлива происходят за счет испарения при низких давлениях с увеличением высоты полета и в результате вскипания топлива при выделении растворенного воздуха.

Процесс перехода жидкости в газообразное состояние называется испарением и для топлив характеризуется температурой стгона 50% объема.

Испарение с неподвижной поверхности в спокойный воздух (статическое испарение) зависит от химического состава, вязкости, коэффициента диффузии паров в воздухе, скрытой теплоты испарения, теплопроводности, теплоемкости, давления насыщенных паров топлива, температуры жидкости и воздуха. Динамическое испарение, при относительном перемещении воздуха и топлива, дополнительно зависит от скорости относительного движения, дисперсности распыливания и др. Оценка испаряемости в динамических условиях не разработана.

Основным параметром, определяющим скорость испарения, является давление насыщенных паров, зависящее от химического состава, температуры и количества растворенного воздуха. Температурная зависимость определяется выражением [23]

$$\lg P_n = A \lg T - \frac{B}{T} + C,$$

где A , B и C — постоянные коэффициенты.

В процессе испарения топлива в баках ЛА большую роль играет его начальная температура. Температура топлива, особенно при быстром подъеме самолета, в первые 30—40 мин. полета изменяется незначительно, что способствует интенсивному испарению его. Например, при $t_{нач} = 40^\circ\text{C}$ керосины ТС-1 и РТ кипят на высоте 20 км, Т-1 — на высоте 28 км. При двухчасовом полете потери составляют менее двух и менее одного процента соответственно. В условиях сверхзвукового полета при $t_{топл} = 117^\circ\text{C}$ и $H = 10$ км потери для Т-1 составляют 1,2%, для ТС-1 — 10,9%. С поднятием на высоту 18 км и той же температуре потери будут соответственно 51 и 77%. Поэтому топлива для самолетов, летающих со скоростями полета 2,2...2,5 М, должны иметь температуру кипения 165—170°C, т. е. на 15—20° выше температуры начала кипения топлив Т-1 и ТС-1 и на 30—40° выше, чем у керосина РТ.

Растворимость воздуха в нефтепродуктах уменьшается с увеличением их поверхностного натяжения, плотности и вязкости. Бензины растворяют 20—25% (объемн.) воздуха, керосины — 13—15% и смазочные масла — 7—11%. Растворимость мало меняется от температуры и значительно больше от давления —

поэтому с подъемом на высоту растворенный в топливе воздух выделяется.

В процессе насыщения топлива воздухом кислород растворяется в большей пропорции, чем азот (коэффициент растворимости при температуре 20°C у азота 0,117, кислорода — 0,202 и CO_2 — 1,17). Соответственно при выделении растворенных газов с подъемом на высоту в надтопливном пространстве баков будет находиться повышенное содержание кислорода.

Выделение растворенного воздуха с подъемом на высоту несколько задерживается до $H = 8$ км. В дальнейшем наблюдается выделение значительного количества его. Объем выделяемого воздуха может составлять несколько сот литров на каждые 1000 литров топлива.

Вибрация ЛА приводит к значительному ускорению процессов испарения и выделения воздуха. В первые 10 мин. [12] скорость испарения топлива Т-1 в 5 раз, а в конце часа — в 1,5 раза больше скорости испарения в статических условиях.

Следует отметить, что испарение топлива и выделение из него растворенного воздуха с подъемом на высоту влияет на работу двигателя, топливных насосов и топливной системы в целом.

3.1. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТОПЛИВАХ

В нефтепродуктах практически всегда имеются бактерии, споры плесневых грибов, которые в условиях хранения топлива на складах ГСМ и в топливных баках ЛА интенсивно размножаются.

Микроорганизмы загрязняют топливо и, следовательно, фильтрующие элементы, трубопроводы, теплообменные поверхности и зазоры прецизионных пар механизмов топливной системы.

Их интенсивное размножение происходит на поверхности контакта топлива с водой — в большинстве случаев на влажных стенках топливных баков ЛА, заправщиков, складов и в местах скопления свободной воды. Однако вода не является обязательной составной частью среды для развития бактерий.

В процессе биологического обмена веществ они выделяют кислые органические вещества и, возможно, сероводород и серную кислоту, вызывающие серьезные повреждения, носящие питтинговый характер, особенно при длительном воздействии внутри застойных участков, вплоть до появления течи кессонных баков.

Микроорганизмы, развивающиеся в системе вода—топливо—минеральные соли, подразделяются на три группы:

Анаэробные бактерии. К ним относятся сульфатовосстанавливающие бактерии, перерабатывающие в сероводород содержащие серу соединения топлива.

Аэробные бактерии. Поглощая растворенный в топливе кислород, этот вид бактерий окисляет сернистые соединения топлива, обеспечивая питанием анаэробные бактерии. Часть бактерий этой группы выделяет серную кислоту.

Грибки, водоросли и споры. Микроорганизмы способствуют засорению фильтров и автоматики топливной системы, изменению физико-химических и эксплуатационных свойств топлив, заметной циклизации и гидрогенизации углеводородов с образованием ароматических структур, вызывают частичный крекинг углеводородов.

Внешние загрязнения биологического характера представляют собой желеобразную подвижную массу коричневого цвета, прочно удерживающуюся на металлической поверхности.

Основными мерами борьбы с микробиологической коррозией являются: регулярный слив и контроль отстоя, тщательная промывка систем и применение биоцидных присадок к топливу. Одной из эффективных присадок в этом направлении является антиводокристаллизующая, например, «жидкость II» (моноэтиловый эфир этиленгликоля).

4. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ НА ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЛА И НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВОПРОСОВ, СВЯЗАННЫХ С ВЛИЯНИЕМ СВОЙСТВ ТОПЛИВ НА ЛА

Все основные показатели надежности авиационной техники, такие как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, при прочих равных условиях могут существенно изменяться под влиянием рассмотренных выше эксплуатационных свойств топлив. Особенно важно то, что потеря работоспособности двигателя или ЛА и их отдельных агрегатов, контактирующих с топливом или продуктами сгорания, может наступить в процессе эксплуатации не только постепенно, но и внезапно. Отсюда высокие требования, предъявляемые к силовым установкам со всеми топливopодающими коммуникациями и агрегатами. Не менее высокие требования предъявляются силовыми установками к качеству топлив.

Влияние свойств реактивных топлив на тактико-технические данные ЛА и на эксплуатационную надежность его силовых установок рассмотрим по отдельным узлам (топливные баки, центробежные подкачивающие или перекачивающие насосы, топливомасляные радиаторы, фильтры, насосы-регуляторы высокого давления, форсунки, газовый тракт), контактирующим с топливом или продуктами его распада по следующим разделам:

- 1) эксплуатационные свойства топлив, влияющие на состояние и работоспособность узлов и элементов силовых установок;
- 2) опасные последствия и эксплуатационные особенности, вызванные неудовлетворительными свойствами топлив;
- 3) тактико-технические показатели ЛА и двигателя, зависящие от эксплуатационных свойств топлив.

В процессе создания, доводки, испытаний и эксплуатации авиационной техники необходимо четко понимать сложную взаимосвязь качества топлива с качеством конструкции и условиями эксплуатации для предупреждения возникновения начальных очагов возможных отказов и неисправностей, обуслов-

лесных неудовлетворительными характеристиками топлив или систем и агрегатов силовых установок ЛА. Следует помнить, что разработка методов раннего обнаружения отказов, обусловленных эксплуатационными свойствами топлив, является актуальным направлением повышения надежности ЛА и снижения стоимости его эксплуатации.

4.2. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОСТОЯНИЕ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ УЗЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Топливные баки

Испаряемость; теплота испарения; температура начала кристаллизации; химическая стабильность; загрязнение топлива механическими примесями в полете и на земле; устойчивость к микробиологической фазе; электризуемость; растворимость газов; давление насыщенных паров; вязкость.

Центробежные насосы

Давление насыщенных паров; растворимость воздуха, вязкость.

Топливомасляные радиаторы

Теплопроводность; теплоемкость; вязкость; давление насыщенных паров; термостабильность; наличие органических кислот, натриевого мыла, соды, кислородосодержащих соединений, меркаптанов и свободной серы.

Фильтры

Механические примеси и вода; термостабильность и химическая стабильность; температура начала кристаллизации.

Насосы-регуляторы высокого давления

Плотность; стабильность; вязкость; противозносные свойства; механические примеси и вода; меркаптаны и свободная сера; водорастворимые кислоты и щелочи; давление насыщенных паров.

Форсунки

Термостабильность; фактические смолы; йодное число; механические примеси; плотность; вязкость; поверхностное натяжение; электризуемость; испаряемость и летучесть.

Газовый тракт

Фракционный состав; люминиметрическое число; высота не-коптящего пламени; зольность; наличие ванадия, молибдена, натрия; содержание меркаптанов и свободной серы; теплота сгорания; пусковые свойства.

4.3. ПЕРЕЧЕНЬ ОПАСНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ, ВЫЗВАННЫХ ПЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ ТОПЛИВ

Топливные баки

Перебои в питании двигателей; потери топлива при вскипании и испарении; накопление зарядов статического электричества; пожар или взрыв; энергетические затраты на перекачку топлива; накопление свободной воды; коррозия и разрушение металлических баков.

Центробежные насосы

Паровоздушные пробки; кавитация; уменьшение и пульсация расхода; автоколебания давления в системе высокого давления из-за срывной работы ц/б насосов; эрозия лопаток насоса.

Топливомасляные радиаторы

Повышение температуры масла; увеличение гидравлического сопротивления; уменьшение прокачиваемости топлива; коррозия элементов конструкции.

Фильтры

Забивка механическими примесями, кристаллами воды и парафина, смолами; падение и колебания оборотов двигателя; остановка двигателя.

Насосы-регуляторы высокого давления

Нарушение работы гидрозамедлителей, ограничителей, дроссельного крана, клапанов, трущихся пар (отказ автоматки, люфты, износ, заедания); жидкостная коррозия; изменение приемистости; резкие колебания или усадка оборотов; помпаж; уменьшение производительности; самовыключение двигателя; увеличение времени приемистости; сложный запуск; невозможность выхода на режим более 70%; самопроизвольная раскрутка ротора.

Форсунки

Засорение клапанов, жиклеров; ухудшение условий запуска; неустойчивость режима работы камеры сгорания и двигателя; снижение расхода; неравномерность распыла; образование нагара; факеление; ухудшение полноты сгорания.

Газовый тракт

Газовая высокотемпературная коррозия; сажеобразование; диссоциация продуктов сгорания; излучение пламени; дымление; локальные прогары; коробление и трещины жаровой трубы; повреждение лопаток турбины; догорание топлива в камере после останова двигателя.

4.4. ПЕРЕЧЕНЬ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛА И ДВИГАТЕЛЯ, ЗАВИСЯЩИХ ОТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТОПЛИВ

Топливные баки

Полетный вес ЛА; дальность и продолжительность полета; полезная нагрузка; надежность ЛА и двигателя.

Центробежные насосы

Высотность; надежность топливной системы и двигателя.

Топливомасляные радиаторы

Температурный режим двигателя и надежность его работы.

Фильтры

Устойчивая и надежная работа двигателя.

Насосы-регуляторы высокого давления

Тяга; высотность ЛА; дальность и продолжительность полета; надежность и экономичность двигателя.

Форсунки

Тяга двигателя; дальность и продолжительность полета; полнота сгорания и загрязнение атмосферы; надежность и экономичность двигателя.

Газовый тракт

Удельный расход топлива; тяга двигателя; дальность и продолжительность полета; токсичность выхлопных газов; полнота сгорания; надежность и экономичность двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов А. Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. — М.: Транспорт, 1970. — 256 с.
2. Виноградов Н. Ф., Спиркин В. Г., Чернова К. С. Исследование эксплуатационных свойств присадок, предотвращающих образование кристаллов льда в реактивном топливе.—В сб.: Эксплуатационные свойства авиационных топлив. — Киев: КИИГА, 1972, вып. 3, ч. II, с. 23—27.

3. Горбунов Г. М., Лепешинский И. А., Рутовский В. Б. Расположение зоны горения в начальной части жаровых труб камер ЖРД. — В сб.: Исследование рабочего процесса в камерах сгорания газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1967. — 208 с.
4. Ильишнко С. М., Талантов А. В. Теория и расчет прямоугольных камер сгорания. — М.: Машиностроение, 1964. — 306 с.
5. Коваленко В. П. Загрязнения и очистка нефтяных масел. — М.: Химия, 1978. — 304 с.
6. Ключарев Л. Г. Чистота авиационных топлив, масел и специальных жидкостей и ее контроль. — Куйбышев, КуАИ, 1983. — 75 с.
7. Кныш Ю. А. Методы снижения токсичности выхлопа воздушно-реактивных двигателей. — Куйбышев: КуАИ, 1979. — 80 с.
8. Лецинер Л. Б., Ульянов И. Е. Проектирование топливных систем самолетов. — М.: Машиностроение, 1975. — 344 с.
9. Лозовский В. Н. Диагностика авиационных топливных и гидравлических агрегатов. — М.: Транспорт, 1979. — 295 с.
10. Назаренко П. В., Козаченко А. И. Влияние присадок в реактивных топливах на деформацию трущихся тел. — В сб.: Эксплуатационные свойства авиационных топлив. — Киев: КИИГА, 1971, вып. 2, с. 70—72.
11. Никитин Г. А. Электрические очистители дизлектрических жидкостей. — Киев: Общество «Знання» Укр. ССР (авиационный транспорт), 1980. — 20 с.
12. Палок К. К., Рагозин Н. А. Словарь по топливам, маслам, присадкам и специальным жидкостям. — М.: Химия, 1975. — 392 с.
13. Паушкин Я. М. Химия реактивных топлив. — М.: Изд. АН СССР, 1962. — 436 с.
14. Пискунов В. А., Зрелов В. Н. Влияние топлив на надежность реактивных двигателей и самолетов. — М.: Машиностроение, 1978. — 270 с.
15. Пискунов В. А., Зрелов В. Н. Испытания топлив для авиационных реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1974. — 200 с.
16. Пчелкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1967. — 208 с.
17. Радзюлин М. В., Сурнов Д. Н. Агрегаты воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1973. — 352 с.
18. Раушенбах Б. В., Белый С. А., Беспалов И. В., Бородачев В. Я., Волмацкий М. С., Прудников А. Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1964. — 526 с.
19. Резников М. Е. Топлива и смазочные материалы для летательных аппаратов. — М.: Оборонгиз, 1973. — 231 с.
20. Соловьев А. Н., Василенко В. Т., Каприлов Н. В., Денисов Э. С. Исследование электризации авиационных топлив. — В сб. Эксплуатационные свойства топлив, смазочных материалов и технических жидкостей, применяемых в ГА. — Киев: КИИГА, 1975, вып. 1, с. 41—42.
21. Смиркин В. Г., Чернова К. С., Тимохина А. В. Топлива и присадки, применяемые для заправки самолетов гражданской авиации за рубежом. — В сб.: Эксплуатационные свойства топлив. — Киев: КИИГА, 1972, вып. 3, ч. II, с. 16—20.
22. Теория воздушно-реактивных двигателей. Под ред. С. М. Шляхтенко. — М.: Машиностроение, 1975. — 568 с.
23. Шишков И. Н., Белов В. Б. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. — М.: Транспорт, 1979. — 247 с.
24. Шетников Е. С. Физика горения газов. — М.: Наука, 1965. — 710 с.
25. Электрические явления при трении, резании и смазке твердых тел. Под ред. М. М. Хрущева и В. А. Бобровского. — М.: Наука, 1973, с. 28—48.
26. IV научно-техническая конференция: Эксплуатационные свойства авиационных топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей (вопросы химмотологии). Киев: — КИИГА, 1977. — 140 с.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ТОПЛИВ В СИЛОВЫХ УСТАНОВКАХ ДА	
1.1. Влияние эксплуатационных свойств реактивных топлив на летно-технические данные самолета	4
1.2. Превращение тепловой (потенциальной) энергии топлива в работу в ВРД	6
1.3. Физические основы рабочего процесса в камерах сгора- ния ВРД	7
1.4. Условия эксплуатации реактивных топлив в ДА	14
1.5. Методы испытания реактивных топлив, определения их физико-химических показателей и эксплуатационных свойств	15
2. СОВРЕМЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ВРД	
2.1. Отечественные реактивные топлива	19
2.2. Реактивные топлива зарубежных стран	22
2.3. Присадки к реактивным топливам	24
2.4. Перспективные топлива для ВРД	28
3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ	
3.1. Стабильность реактивных топлив	30
3.1.1. Стабильность топлив в условиях длительного хранения	30
3.1.2. Изменение стабильности топлива в топливных системах дозвуковых самолетов	33
3.1.3. Изменение стабильности топлив при высоких темпе- ратурах	34
3.2. Фильтрация и очистка топлив	35
3.2.1. Фильтрация топлив	35
3.2.2. Очистка топлив	37
3.3. Прокачиваемость топлив	39
3.3.1. Прокачиваемость топлив при низких температурах	39
3.3.2. Прокачиваемость топлив при высоких температурах	42
3.4. Противознозные свойства реактивных топлив	43
3.5. Коррозионные свойства топлив	47
3.5.1. Жидкофазная коррозия	47
3.5.2. Газовая высокотемпературная коррозия	48
3.6. Электризация топлив	49
3.7. Пусковые свойства топлив	51
3.7.1. Температура воспламенения топлив	51
3.7.2. Температура самовоспламенения топлив	52
3.7.3. Летучесть топлив	53
3.7.4. Пожарная опасность	53

3.8. Влияние свойств топлив на нагарообразование в двигателе	54
3.9. Интенсивность теплового излучения пламени	57
3.10. Потери топлива в высотных условиях	58
3.11. Биологические процессы в топливах	59
4. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ НА ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ЛА И НА- ДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК	
4.1. Классификация вопросов, связанных с влиянием свойств топлив на ЛА	61
4.2. Перечень эксплуатационных свойств топлив, влияющих на состояние и работоспособность узлов и элементов силовых установок	62
4.3. Перечень опасных последствий и эксплуатационных особен- ностей, вызванных неудовлетворительными свойствами топ- лив	63
4.4. Перечень тактико-технических показателей ЛА и двигателя, зависящих от эксплуатационных свойств топлив	64
Л и т е р а т у р а	64

Св. план, 1986, поз. 105

Борис Алексеевич Удлов

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА РЕАКТИВНЫХ
ТОПЛИВ И НАДЕЖНОСТЬ АВИАЦИОННЫХ
СЕРВІСНЫХ УСТАНОВОК

Редактор Т. К. Крегвинни
Техн. редактор Н. М. Калеснюк
Корректор Н. С. Курьянова

Стано в набор 10.01.86 г. Подписано в печать 31.03.86 г.
ГО 00151. Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.
Печать высокая. Гарнитура литературная.
Усл. п. л. 4,0. Уч.-изд. 3,9. Т. 500 экз.
Заказ 145. Цена 15 к.

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

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