

М. Е. РЕЗНИКОВ

ТОПЛИВА
И
СМАЗОЧНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ

Под редакцией
В. Г. СТОЛЯРОВА

Ордена Трудового Красного Знамени
ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СССР
МОСКВА — 1973

6Т5.1

Р34

УДК 629.7.662 + 621 · 892 + 532.004 (0,75 · 8)

Автор искренне благодарит за советы и замечания А. Г. Руднева и Ю. М. Майзеля, внимательно прочитавших всю рукопись, С. Э. Крейна, Я. Б. Черткова, Б. А. Энглина, прочитавших отдельные ее разделы или главы. Автор весьма признателен В. Г. Столярову за активное участие в доработке рукописи.

ВВЕДЕНИЕ

Тактико-технические показатели и эксплуатационная надежность летательных аппаратов в большей мере, чем любых других объектов техники, зависят от состава и качества топлив, масел, смазок, технических жидкостей. Боевая мощь ракетоносных Военно-Воздушных Сил и огромные масштабы авиационных перевозок в немалой степени обязаны достижениям советской науки и промышленности в области разработки и производства топлив и смазочных материалов. Благодаря повседневному вниманию Коммунистической партии и Советского правительства бурное развитие авиационной и ракетной техники подкрепляется непрерывным ростом и совершенствованием необходимой для нее топливной базы.

Основатель Коммунистической партии и Советского государства В. И. Ленин, заботясь об организации Красного Воздушного флота, в тяжелых условиях гражданской войны не упускал из виду вопросы обеспечения аэропланов топливом. Владимир Ильич лично и через руководящие органы молодой Советской республики к строительству Воздушного флота и выработке топлива для него привлек выдающихся ученых и инженеров, перешедших на сторону революции. Их научные идеи были подхвачены и развиты тысячами энтузиастов науки и техники, направленных партией в авиацию, самолетостроение, нефтяную и химическую промышленность.

Продолжая традиционную связь с практикой, заложенную в области переработки нефти корифеем русской науки Д. И. Менделеевым, советские ученые обеспечили успешное решение проблем авиационных и ракетных топлив и смазочных материалов. Еще в 1918 г. Н. Д. Зелинский наладил под Москвой получение бензина для молодой советской авиации на основе предложенного им процесса каталитического крекинга [89]¹. Открытые Н. Н. Семеновым в 20-х годах законы цепных реакций были применены учеными его школы к процессам в авиационных двигателях, что позволило определить требования к топливу для них. К. Э. Циolkовский выдвинул руководящие идеи в области подбора горючих и

¹ В квадратных скобках указан порядковый номер списка литературы, помещенного в конце книги.

окислителей для ракетных двигателей (он даже предполагал возможным использование в них свободных радикалов и атомной энергии). Ученые и специалисты Реактивного НИИ — ученики и продолжатели его дела — еще в 30-е годы разработали и испытали конкретные составы топлив, лежащие в основе современной ракетной техники [56]. Фундаментальные идеи Н. П. Петрова (80-е годы прошлого века) в области трения и смазки, развитые и усовершенствованные на основе современных достижений физики и химии, позволили определить состав и обеспечить необходимые свойства смазочных материалов для работающих в сложных условиях узлов трения летательных аппаратов.

Для современного периода характерно формирование особой отрасли науки, изучающей физические и химические процессы в двигателях, которые определяются применяемыми в них топливами и маслами, науки о применении топлив и смазочных материалов (крупнейший советский специалист в этой области проф. К. К. Папок предложил назвать ее *химмотологией*). Ее задача — исследовать и обеспечить соответствие между топливами и маслами, с одной стороны, и двигателями (их конструкцией и параметрами, материалами, режимами работы), с другой стороны. С развитием реактивной техники, невиданным ростом скорости, высоты, дальности и продолжительности полетов, с повышением силовой и тепловой напряженности двигателей и систем летательных аппаратов в этой области встают все новые и новые сложные проблемы. Воздействие жестких условий полета вызывает необратимые изменения состава и свойств топлив, смазочных материалов, технических жидкостей, которые в результате этого в свою очередь могут вызывать неисправности, отказы в работе двигателей и систем, разрушение отдельных деталей и узлов [35].

Ввиду опасных последствий отказов в работе техники обеспечение надежности для летательных аппаратов всегда является проблемой № 1. Поэтому главное внимание обращается на эксплуатационные свойства топлив, смазочных материалов и жидкостей, от которых зависит надежность двигателей и систем летательных аппаратов: повышение термостабильности, уменьшение нагарообразования, снижение коррозионной активности, улучшение противоизносных свойств и т. д. При этом всегда сохраняется проблема повышения эффективности топлив и смазочных материалов, ибо каждый лишний килограмм топлива, масла, жидкости, поднятый летательным аппаратом, соответственно снижает полезную нагрузку или боевые возможности летательного аппарата.

Непрерывный прогресс качества топлив и смазочных материалов отнюдь не снижает остроту этих проблем, так как опережающее развитие авиации, космонавтики, ракетной техники требует решения еще более сложных вопросов, служит источником новых противоречий, трудностей роста, которые предстоит преодолеть. При этом отрицательный эффект некоторых свойств топлива или масла, неудовлетворительных в особо жестких условиях, прихо-

дится компенсировать конструктивными и технологическими мероприятиями. В системе летательный аппарат — топливо (или масло) все взаимно связано. Если недостаточно высокое качество топлива (или масла) снижает эффективность и надежность летательного аппарата, то повышение требований к топливу (или маслу) приводит к удорожанию последних, к сокращению возможностей их массового производства, т. е. может привести к нерентабельности техники или невозможности обеспечить ее необходимым количеством топлива (или масла).

Грандиозные планы развития нефтяной и химической промышленности, переработки нефти и газа, намеченные XXIV съездом КПСС, обеспечивают возможность получения всех видов и сортов топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей, необходимых для авиационной техники.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ТОПЛИВА

Глава 1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОПЛИВ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТОПЛИВ

Основные понятия

Двигатели внутреннего сгорания, установленные на летательных аппаратах, создают силу тяги за счет тепловой энергии. Вещества, расходуемые с целью получить тепловую энергию, называются топливами. В двигателях эта энергия с помощью газообразного рабочего тела преобразуется в механическую работу от броса газовой струи или вращения воздушного винта.

Выделение энергии топливом может происходить в результате химических или ядерных процессов; соответственно топлива делятся на химические и ядерные. Обычные химические топлива (керосин, бензин и др.) выделяют энергию при сгорании — быстротекущем процессе окисления. Для сгорания требуется не только горючее вещество, но и окислитель. В воздушно-реактивных и поршневых двигателях (ВРД и ПД) окислителем служит атмосферный воздух. Топливо для этих двигателей окислителя не содержит; оно состоит из одного лишь горючего вещества. Термины «топливо» и «горючее» применительно к этим двигателям равнозначны. Воздух не принято считать составной частью топлива, так как он поступает извне, а не расходуется с борта летательного аппарата.

Ракетные двигатели не потребляют окислителя извне. В жидкостных ракетных двигателях окислителем, как правило, является отдельное вещество (жидкий кислород или азотная кислота и др.), которое берется на борт летательного аппарата наряду с горючим веществом. В этом случае понятия «топливо» и «горючее» неравнозначны; топливо состоит из двух компонентов — горючего и окислителя. В ракетных двигателях применяются также однокомпонентные (унитарные) топлива, главным образом твердые, в состав которых входит необходимый для горения кислород. Иногда в качестве однокомпонентного ракетного топлива используются вещества, которые не горят, но разлагаются с выделением тепла (например, перекись водорода, гидразин). Это тоже химические топлива, так как выделение ими энергии происходит в результате химических процессов рекомбинации атомов в более устойчивые молекулы по сравнению с исходными.

Кроме основного назначения — выделения энергии топливо обычно выполняет функцию источника рабочего тела — газовой смеси, с помощью которой осуществляется рабочий процесс двигателя. Основным источником рабочего тела воздушно-реактивных и поршневых двигателей является воздух; топливо и продукты его сгорания составляют лишь небольшую часть рабочего тела. В ракетных двигателях рабочее тело образуется целиком из топлива.

Во многих двигателях жидкое топливо попутно используется для охлаждения горячих узлов и деталей, охлаждения масла, гидравлического управления агрегатами [60, 81, 97]¹.

Состав топлив для ВРД

Примерная схема классификации топлив летательных аппаратов, составленная на основе систематизации данных о составе современных и перспективных топлив, предназначенных для различных двигателей, приведена на рис. 1.

Большая часть современных авиационных топлив воздушно-реактивных и поршневых двигателей — это жидкие смеси углеводородов, получаемые путем переработки нефти. Их обычно различают по температурам выкипания: *авиабензин* выкипает в пределах примерно 140—180° С, *авиакеросин* — 120—280° С, *утяжеленный керосин* — 200—315° С. Используются также широкофракционные топлива, т. е. смеси бензина и керосина. Перспективными² топливами для воздушно-реактивных двигателей считаются ожигенные углеводородные газы, синтетические индивидуальные углеводороды, жидкий водород; менее вероятно, но в принципе возможно применение гидридов — соединений водорода с другими элементами (боранов, гидразина, аммиака), спиртов, суспензий и органических соединений металлов (алюминия, магния и др.). По сравнению с нефтяными топливами одни из них дают больше тепла в расчете на единицу веса или объема топлива, другие — на единицу количества прокачиваемого через двигатель воздуха [10, 35, 60, 73, 81].

Состав ракетных топлив

Все перечисленные вещества, начиная от углеводородов, используются в качестве горючего компонента топлив жидкостных ракетных двигателей. За рубежом преимущественное применение в последние годы приобретают гидриды азота и их органические производные, а также *жидкий водород*. Окислительным компонентом этих топлив могут быть *жидкий кислород* и *кислородсодержащие*

¹ Здесь и далее в конце каждого подраздела в квадратных скобках указаны порядковые номера списка литературы, помещенного в конце книги.

² На рис. 1 соединительные линии к перспективным топливам проведены штрихами.

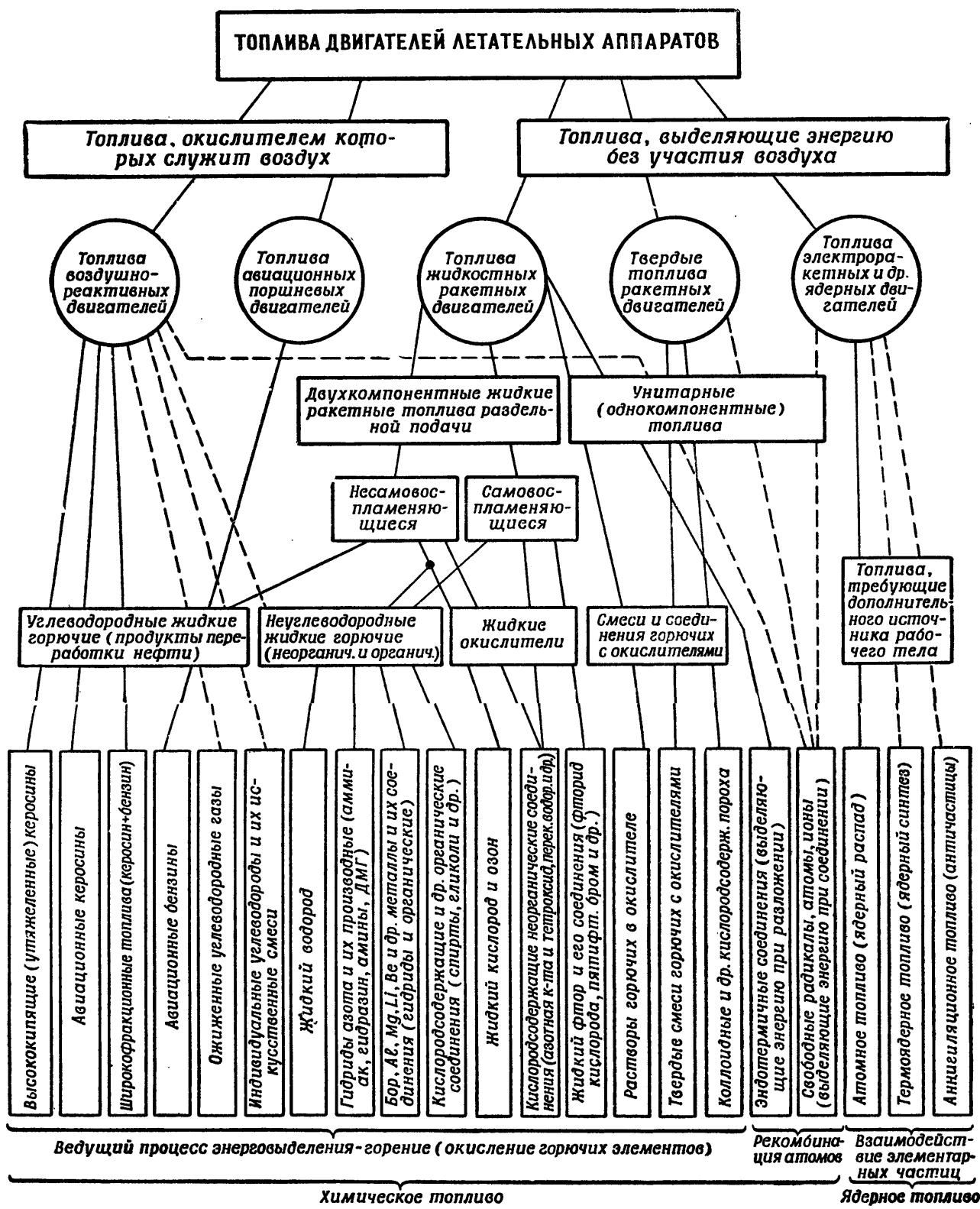


Рис. 1. Классификация авиационных и ракетных топлив

соединения, которые способны отдать на окисление горючего значительное количество кислорода. Перспективным окислителем считается *жидкий фтор* и его соединения. Топлива на основе жидкого кислорода относятся к группе несамовоспламеняющихся при запуске двигателя, на основе жидкого фтора — к группе самовоспламеняющихся. Топлива на основе кислородсодержащих окислителей относятся к той или иной группе в зависимости от конкретного состава горючего компонента.

К числу унитарных топлив относятся, во-первых, стабильные в условиях хранения смеси или растворы горючего и окислителя; во-вторых, вещества, в состав молекул которых входит кислород, обеспечивающий их сгорание; в-третьих, так называемые *эндотермичные* вещества, поглощающие энергию при образовании из простых веществ и соответственно выделяющие ее при разложении [9, 29, 38, 55, 73, 86, 90, 91].

Новые источники энергии

Делаются попытки создания особого рода химического топлива для воздушно-реактивных и ракетных двигателей, которое выделяет энергию в результате соединения *свободных атомов и радикалов* (осколков молекул). Наконец, отдельную группу перспективных топлив, выгодную главным образом для электроракетных двигателей, составляет обычное *атомное* топливо на основе расщепляющихся изотопов урана и плутония, которое освоено в стационарных и корабельных ядерных реакторах, и термоядерное топливо на основе синтеза дейтерия, трития и др. [47, 55, 73, 119, 131].

ПРОЦЕССЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Сущность горения

Горение обычного топлива — это быстрая реакция окисления, в ходе которой его химическая энергия превращается в основном в тепловую, а само топливо — главным образом в газообразные продукты. Горючими элементами в составе большинства современных топлив являются углерод и водород. Кроме них в составе некоторых ракетных топлив горючими элементами являются алюминий, магний, бор, бериллий, литий. Сущность окисления заключается в переходе валентных (внешних) электронов от атомов горючего элемента к атомам элемента-окислителя. Приобретая в результате этого положительный заряд, атомы горючего притягиваются к отрицательно заряженным атомам элемента-окислителя, например кислорода или фтора, и образуют молекулы продуктов окисления — углекислого газа CO_2 , паров воды H_2O , фтористого водорода HF и др.

Реакции окисления — цепные. Они состоят из ряда повторяющихся звеньев, в ходе которых образуются активные частицы — свободные атомы и радикалы. Ничтожно малого количества активных промежуточных продуктов достаточно для непрерывного про-

текания цепного превращения, в которое звено за звеном втягивается большая масса исходных веществ (например, углеводорода и кислорода). Чтобы окисление происходило в форме горения, должны существовать условия для быстрого перемещения активных частиц и разветвления цепей реакций. Такие условия имеются только в газовой среде, их нет в жидких и твердых телах. Жидкое топливо сначала превращается в пар, а твердое разлагается, образуя пары и газы (газифицируется), и лишь после этого они горят. Например, керосин до температуры плюс 28—30°С почти не испаряется и вследствие этого не загорается от поднесенного пламени. Чтобы топливо могло гореть, нужно создать условия для его испарения или газификации. Такие условия могут быть созданы нагревом поверхности жидкого или твердого топлива от зоны горения газов, от внешнего источника или же в результате экзотермических реакций внутри самого топлива [23, 46, 52, 88, 94].

Воспламенение

Горение смеси возбуждается химически активными частицами, которые обладают достаточной энергией для разрушения химических связей атомов в молекулах горючего и окислителя. Активные частицы возникают при сильном подогреве горючей смеси электрической искрой или раскаленной поверхностью, или путем резкого сжатия, или иным способом. Условием воспламенения является превышение скорости выделения тепла за счет экзотермических реакций в первоначально подогретом объеме смеси (очаге воспламенения) над скоростью теплоотдачи в окружающее пространство. Выделение тепла в очаге воспламенения пропорционально объему, а отвод — площади его поверхности; размер очага пропорционален их отношению. Чем меньше химическая активность и теплотворность смеси, тем больший начальный очаг воспламенения необходим для ее поджигания [46, 75, 88, 94].

Распространение пламени

После воспламенения *нормальное* распространение пламени в спокойной, незавихренной смеси происходит со скоростью 10—30 см/сек (*ламинарное горение*). Соприкасающийся с пламенем слой свежей смеси нагревается до температуры 1500—3000°С и выше (температура зависит от состава газовой смеси), химически активируется потоком активных частиц и загорается. Толщина зоны пламени порядка 0,1 мм и менее.

Скорость высокотемпературных химических реакций (ω) чрезвычайно резко (по экспоненте) зависит от температуры; согласно закону Аррениуса

$$\omega \sim e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (1.1)$$

где E — энергия активации, которую нужно сообщить газу для возникновения данной реакции;

R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Это способствует стягиванию зоны горения в поверхность — тонкий фронт качественного скачка, в котором вместе с резким повышением температуры происходит резкий переход состава газа от исходной горючей смеси до продуктов сгорания, сопровождаемый тепловыделением. Время этого превращения порядка миллисекунды и меньше. Рост температуры вызывает локальное (в тонком слое) увеличение скорости реакции и тепловыделения, что в свою очередь обеспечивает максимально возможный при данном химическом превращении рост температуры.

Движение газа в камере сгорания двигателя многократно увеличивает скорость распространения пламени. Пламя энергично «проталкивается» в свежую смесь резко расширяющимися горячими продуктами сгорания, фронт его искривляется турбулентными пульсациями скорости, отдельные очаги горения забрасываются пульсациями вперед (эстафетное распространение пламени). На извилистой и увеличенной за счет эстафетных очагов поверхности горения сжигается за то же время во много раз больше горючей смеси, чем могло бы сгореть на гладком фронте пламени. Кроме того, мелкомасштабные пульсации скорости увеличивают число столкновений молекул. В конечном счете скорость *турбулентного* горения достигает 20—40 м/сек [21, 46, 52, 94, 114].

Диффузионное горение

Зона горения впрыскиваемого в камеру топлива обычно представляет собой размытый в пространстве факел со сложной внутренней структурой, состоящей из перемежающихся участков испарившегося топлива (горючего), чистого воздуха (или паров окислителя) и продуктов сгорания, которые смешиваются между собой. Такой факел называется *диффузионным*. «Поверхностный» механизм горения, по-видимому, сохраняется и в этих условиях. Фактические участки горения самопроизвольно (в силу закона Аррениуса) стягиваются в тонкие слои там, где смешиваемые газы обеспечивают максимальный подъем температуры при горении. Скорость реакций горения при этом ограничивается скоростью переноса паров горючего и воздуха (или паров окислителя) к поверхности горения и мало зависит от химических свойств топлива [21, 52, 114].

Химический механизм горения

Для углеводородных топлив, несмотря на огромное число исследований, химический механизм горения во многом остается неясным. Основной подход к высокотемпературному окислению углеводородных топлив заключается в изучении цепных процессов образования и распада газообразных промежуточных продуктов (перекисей, альдегидов и др.) при относительно низких температурах и экстраполяции этих процессов в область высоких температур по закону Аррениуса — формула (1.1). Однако этот подход не дает объяснения некоторым практически важным явлениям: наличию в пламени углеводородов твердой фазы — мельчайших частиц чистого углерода (сажи) размером в десятые — сотые доли микрона, явлениям дымления и нагарообразования. Если сажа выгорает и ее не остается в конечных продуктах сгорания, она об-

наруживает себя резким (в несколько раз) повышением энергии излучения пламени и мощной электронной эмиссией. Тепловое и электронное излучение углеводородного пламени настолько интенсивно, как будто оно представляет собой твердое тело, а не газовую смесь.

Концентрация сажи в пламени, судя по интенсивности его излучения, зависит от доли углерода в углеводороде и в еще большей степени от строения углеводородного скелета молекул. Двухфазность углеводородного пламени может быть не случайным явлением, как это считалось до последнего времени, а ведущей стадией процесса горения углеводородов. В частности, ход процесса можно представить¹ как дегидрогенизацию (пиролиз) углеводородных молекул с образованием свободного водорода, углеродного пара и частично продуктов их промежуточного окисления, затем — конденсацию углеродного пара в сажу при его пересыщении и, наконец, сгорание сажи, водорода и продуктов промежуточного окисления [46, 52, 113, 114].

Нагарообразование

При высокой концентрации сажи в пламени она может осаждаться на стенках камеры сгорания и ее деталях. Иногда образуются плотные углеродистые нагары, обусловленные, по-видимому, термическим разложением и окислительной конденсацией жидкой фазы топлива — капелек, попавших на твердую поверхность. Нагарообразование усиливается, если жидкое топливо забрасывается вихрями на стенки и детали камеры сгорания, а также при худшей испаряемости топлива.

Наибольшую склонность к сажеобразованию и образованию углеродистого нагара проявляют ароматические углеводороды, молекулы которых содержат компактную, трудно разрушающую группировку из шести атомов углерода и особенно бициклические ароматические углеводороды с еще более компактной группировкой из 10 атомов углерода [7, 58, 73].

Детонация

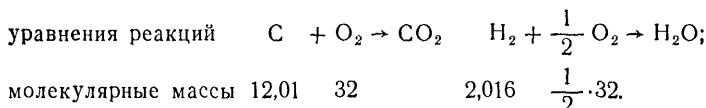
При высокой химической активности горючей смеси горение может приобрести характер детонации (взрыва): в горящей смеси возникают сверхзвуковые ударные волны давления и резко повышается скорость пламени (до нескольких сотен и даже тысяч метров в секунду). Детонационная (взрывная) волна представляет собой совместное распространение ударной волны сжатия, вызывающей самовоспламенение топлива, и волны горения, которое поддерживает ее выделяемой энергией. При детонации температура в зоне реакции выше, чем при нормальном горении. Детонация вызывает опасные для двигателей тепловые и механические нагрузки [52, 94, 113].

¹ Точка зрения автора.

ПОТРЕБНОЕ КОЛИЧЕСТВО ОКИСЛИТЕЛЯ

Стехиометрический коэффициент элементов

Количество кислорода, теоретически необходимое для полного окисления горючих элементов, можно определить по уравнениям реакций окисления. Так, для углерода и водорода:



Следовательно, на 1 кг углерода идет $32 : 12,01 = 2,66$ кг кислорода, а на 1 кг водорода — $16 : 2,016 = 7,94 \approx 8$ кг кислорода, т. е. в три раза больше. Из аналогичных расчетов следует, что для сгорания 1 кг металлов и бора требуется меньше кислорода (см. табл. 13).

Количественные соотношения, в которых вещества реагируют друг с другом без остатка, называются стехиометрическими. Стехиометрическое отношение $x_0 = \frac{\text{кг окислителя}}{\text{кг горючего}}$ называют стехиометрическим коэффициентом горючей смеси или ракетного топлива, в состав которого входят и горючее, и окислитель.

В воздушно-реактивных и поршневых двигателях для сжигания топлива используется воздух. Он содержит 23,1% кислорода (по весу), т. е. в 1 кг воздуха содержится 0,231 кг кислорода. Следовательно, потребное количество воздуха (его принято обозначать l_0) в $1/0,231$, т. е. в 4,33 раза больше потребного количества кислорода: для водорода 34,4 кг, для углерода 11,5 кг [23, 73].

Стехиометрический коэффициент сложных горючих

Чтобы определить, сколько кислорода требуется для полного сгорания 1 кг топлива сложного состава, нужно знать его элементный состав: весовое содержание в нем горючих элементов $[C]_r$, $[H]_r$ и т. д., а также кислорода $[O]_r$, если он содержится в горючем веществе. Очевидно, что для полного сгорания 1 кг топлива требуется кислорода (в кг)

$$x_0 = 2,66 [C]_r + 7,94 [H]_r - [O]_r. \quad (1.2)$$

Пример. Для сгорания 1 кг керосина, состоящего из 0,86 кг углерода и 0,14 кг водорода, необходимо кислорода $x_0 = 0,86 \cdot 2,66 + 0,14 \cdot 7,94 = 3,40$ кг или воздуха $l_0 = \frac{3,40}{0,231} = 14,7$ кг.

Значения стехиометрического коэффициента различных горючих, рассчитанные по формуле (1.2), приведены в табл. 1.

Чем больше водорода в углеводородном топливе, тем больше кислорода нужно для полного сгорания топлива. При сгорании спирта или другого содержащего кислород горючего соответственно меньшее его количество потребляется извне. Невелико потреб-

Таблица 1

ПОТРЕБНОЕ КОЛИЧЕСТВО КИСЛОРОДА И ВОЗДУХА ДЛЯ ПОЛНОГО
ОКИСЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ГОРЮЧИХ (кг окислителя/кг горючего) [23, 73, 86]

Горючее (безводное)	Химическая формула	Молекулярная масса	Элементный состав в кг/кг			Потребное количество x_0	Потребное количество воздуха l_0
			углерод [C] _г	водород [H] _г	кислород [O] _г и другие элементы		
<i>Углеводороды.</i>							
Парафиновые	C_nH_{2n+2} ($n = 5 \dots 18$)	72—236	0,845 ¹	0,155 ¹	—	3,49 ¹	15,05 ¹
Нафтены, олефины	C_nH_{2n}	14,03 · n	0,857	0,143	—	3,43	14,78
Ароматические	C_nH_{2n-6} ($n = 7 \dots 10$)	92—134	0,90 ¹	0,10 ¹	—	3,20 ¹	13,8 ¹
Бензины, керосины	C_nH_m	100—200	0,86 ¹	0,14 ¹	—	3,40 ¹	14,7 ¹
Каучук бутадиенсти- рольный	$(C_4H_6 \cdot C_2H_3 \cdot C_6H_5)_x$	158,24 · x	0,912	0,088	—	3,13	13,6
Метан	CH_4	16,05	0,749	0,251	—	3,98	17,23
<i>Кислородсодержащие горючие:</i>							
Метиловый спирт	CH_3OH	32,04	0,375	0,125	0,500	1,50	6,47
Этиловый спирт	C_2H_5OH	46,06	0,522	0,130	0,348	2,09	9,00
Каучук полисульфид- ный	$(C_4H_8OS_4)_x$	200,37 · x	0,240	0,040	0,080 [S] _г 0,64	0,88 ² 1,52 ³	3,81 ² 6,58 ³

¹ Приблизительные данные.² Без сгорания серы.³ Со сгоранием серы.

Горючее (безводное)	Химическая формула	Молекулярная масса	Элементный состав в кг/кг			Потребное количество кислорода x_0	Потребное количество воздуха I_0
			углерод [C] _г	водород [H] _г	кислород [O] _г и другие элементы		
<i>Азотсодержащие горючие:</i>							
Аммиак	NH ₃	17,03	—	0,176	0,824	1,41	6,07
Гидразин	N ₂ H ₄	32,05	—	0,125	0,875	1,00	4,33
Метилгидразин	CH ₃ N ₂ H ₃	46,07	0,261	0,131	0,608	1,73	7,43
Диметилгидразин	(CH ₃) ₂ N ₂ H ₂	60,09	0,400	0,133	0,467	2,12	9,16
Триэтиламин	(C ₂ H ₅) ₃ N	101,18	0,713	0,148	0,139	3,09	13,33
Ксилидин	(CH ₃) ₂ C ₆ H ₃ NH ₂	121,23	0,793	0,116	0,091	3,04	13,06
Каучук полиуретановый	[NHCOO(CH ₂) ₆] _г	143,18·x	0,588	0,091	0,099 [O] _г 0,215	2,08	9,00
Нитроцеллюлоза	[C ₇ H ₆ O ₂ (OH) ₁₋₂ · (ONO ₂) ₂₋₃] _г	272,4	0,265	0,028	[N] _г 0,126 ¹ [O] _г 0,581 ¹	0,316	1,37
<i>Борсодержащие горючие:</i>							
Пентаборан	B ₅ H ₉	67,17	—	0,141	0,859	3,03	13,10
Декаборан	B ₁₀ H ₁₄	122,31	—	0,114	0,886	2,88	12,45

¹ Приблизительные данные.

ное количество кислорода и для горючих, содержащих азот, так как он при сгорании топлива почти полностью переходит в свободное состояние — образует молекулы N_2 . Если топливо содержит бор и металлы, то к формуле (1.2) соответственно добавляются члены 2,22 [B]_f; 0,89 [A]_f и т. д. (согласно табл. 13) [9, 55, 73, 81, 86].

Коэффициент избытка окислителя

Реальный состав горючей смеси в двигателях обычно отличается от стехиометрического. Его принято выражать коэффициентом избытка окислителя (или воздуха, если он служит окислителем) α — отношением действительного количества окислителя (или воздуха) в смеси к стехиометрическому. При $\alpha=1$ (стехиометрическая смесь) обеспечивается полное сгорание топлива без остатка избыточного окислителя. При $\alpha>1$ (бедная смесь) после полного окисления горючего остается избыток окислителя. При $\alpha<1$ (богатая смесь) из-за недостатка окислителя происходит неполное сгорание, продукты сгорания содержат окись углерода CO (угарный газ), иногда свободный углерод (сажу), водород H_2 , простейшие углеводороды и другие способные гореть вещества [55, 97].

ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Высшая и низшая теплотворность

Теплотой сгорания (теплотворностью) называется количество тепла, выделяемое при полном сгорании 1 кг топлива и охлаждении продуктов сгорания до исходной температуры (обычно 20°С). Ее определяют опытным путем, сжигая в калориметре (рис. 2) в среде сжатого кислорода 0,5—0,6 г топлива. Выделенную теплоту рассчитывают по нагреву воды в калориметрическом сосуде.

Водяной пар, образуемый при сгорании топлива (окислении водорода), в калориметре конденсируется, выделяя при этом около 600 ккал/кг воды. Калориметрическую теплоту сгорания называют высшей (H_0). При работе двигателей теплота конденсации паров, выбрасываемых в атмосферу, не используется, поэтому для характеристики топлива применяют низшую теплоту сгорания, которая меньше высшей на теплоту конденсации паров воды:

$$H_u = H_0 - 600W, \quad (1.3)$$

где W — количество воды в кг, образующейся при сгорании 1 кг топлива.

Для обычных углеводородных топлив $W = 1,15 \div 1,35$ кг воды/кг топлива. Следовательно, H_u меньше H_0 примерно на 700—800 ккал/кг. Величину W находят по содержанию водорода [H] в топливе ($W = 9[H]$ кг воды/кг топлива) или непосредственным измерением количества образующейся в калориметре воды [27, 73, 97].

Зависимость теплоты сгорания топлива от его химического состава

Теплота сгорания зависит от элементного состава топлива и от прочности связей в молекулах топлива и продуктов

Лупа 6-9-кратного увеличения

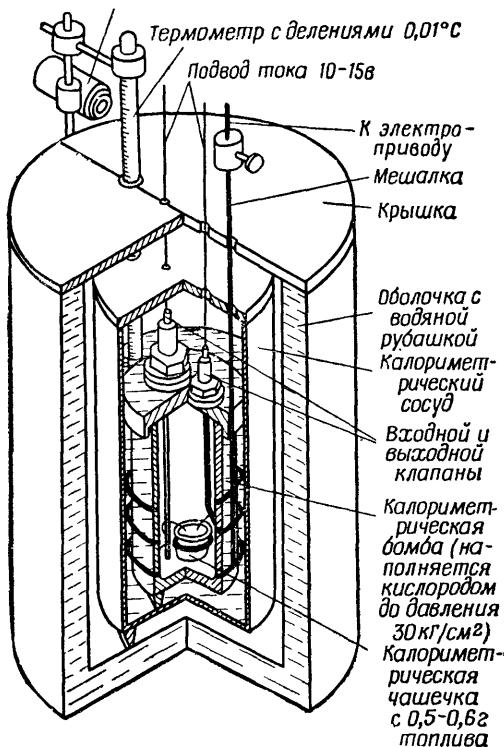


Рис. 2. Устройство калориметра

окисления. Выделение тепловой энергии при сгорании можно представить себе как результат двух процессов (рис. 3):

1) разрыва относительно слабых химических связей С—С, С—Н и других между атомами в молекулах горючего и окислителя, на что затрачивается энергия (подводимой энергии приписывается знак плюс¹⁾;

2) образования прочных химических связей между атомами горючих и окислительных элементов Н—О, С—О и других в молекулах окислов, при которых энергия выделяется (поскольку процесс рассматривается при постоянной температуре эта энергия отводимая ей приписывается знак минус). Каждая химиче-

¹ Указанное правило знаков, противоположное принятому в химии, обычно используется в термодинамических расчетах и справочниках.



Рис. 3. Схема взаимосвязи теплоты образования, энталпии и теплотворности топлива (для условно изотермического процесса сгорания выделенное тепло является отводимым и имеет знак минус)

ская связь имеет определенную «энергетическую прочность»: связь C—C 85—90 ккал/моль, связь C=C 145 ккал/моль, связь C—H 95—98 ккал/моль, связь H—H 103 ккал/моль, связь O—O 118 ккал/моль, связь H—O 115 ккал/моль, связь C—O 150 ккал/моль и т. д. Таким образом, химическая энергия веществ выражается в тепловых единицах [39, 73, 86].

Полная энталпия

В термодинамике применяется понятие энталпии $i = u + RT = C_p T$ (где u — внутренняя энергия, C_p — теплоемкость при постоянном давлении, R — газовая постоянная, T — абсолютная температура). Ее изменение происходит при любых видах подвода и отвода энергии. При переходе топлива из одного состояния в другое (например, при ожигании газов или аллотропных превращений) и при диссоциации продуктов сгорания она является наиболее удобным способом выражения энергетических изменений. Условно принято считать равной нулю полную энталпию простых веществ при стандартной температуре 20°С в обычном устойчивом состоянии (газы Н₂, О₂, твердый графит С и др.). Поэтому энталпия сложного вещества при стандартных условиях равна теплоте его образования из простых веществ. Для горючих она обычно невелика, например для смеси углеводородов, входящих в состав нефтяного топлива $i = -400 \div 500$ ккал/кг. При образовании окислов выделяется значительно больше тепла: для CO₂ $i = -2140$ ккал/кг, для H₂O $i = -3210$ ккал/кг (при 20°С). Теплотворность горючего равна разности энталпии горючего и продуктов его сгорания (окислов) [55, 77].

$$H_u = i_r - i_{\text{п. с.}} \quad (1.4)$$

Схема расчета теплотворности

На рисунке 3 (справа) показано, что теплотворность как тепловой эффект разложения сложного вещества на атомы и образования окислов из атомов не отличается от теплового эффекта разложения сложного вещества на простые и окисление простых веществ.

Теплотворность важнейших горючих простых веществ при окислении кислородом и фтором приведена в табл. 2; она равна энталпии соответствующих продуктов окисления с обратным знаком, отнесенными к 1 кг горючего. При сгорании во фторе выделяется больше тепла, чем в кислороде (в расчете на 1 кг горючего). Выделение тепла при сгорании металлов зависит от состояния продуктов их окисления (твердого, жидкого или газообразного). Соответственно для них различают высшую и низшую теплотворность; последняя не включает теплоту конденсации продукта окисления металла. Сжигание металлов может представлять интерес при условии образования главным образом твердых, но не газообразных продуктов сгорания. Образование газообразных окислов магния (Mg) и бериллия (Be) требует даже большей затраты тепла, чем выделяется при их сгорании [9].

Теплотворность сложных веществ

При полном окислении 1 кг чистого углерода (графита) газообразным молекулярным кислородом О₂ выделяется 7850 ккал, при окислении 1 кг молекулярного водорода Н₂ в водяной пар — 28 700 ккал (в 3,66 раза больше). Исходя из выражения (1.4) теп-

Таблица 2

ТЕПЛОТВОРНОСТЬ ВАЖНЕЙШИХ ГОРЮЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ.
ккал/кг горючего [86]

Наименование горючего элемента и состояние простого вещества	Окисление газообразным кислородом (O_2)		Окисление газообразным фтором (F_2)	
	Продукт сгорания и его состояние	Теплотворность	Продукт сгорания и его состояние	Теплотворность
Углерод (C) твердый (графит)	CO_2 , газ; CO , газ	7850; 2200	CF_4 , газ —	18 340 —
Водород (H_2), газ	H_2O , пар	Низкая 28 700	HF , газ	64 300
Бор (B) твердый	B_2O_3 , твердый (ниже $450^\circ C$). B_2O_3 , жидккий (выше $450^\circ C$). B_2O_3 , газ (выше $2225^\circ C$)	1-я высшая 14 000. 2-я высшая 13 760. Низкая 9200	BF_3 , газ — —	25 000 — —
Магний (Mg) твердый	MgO , твердый (ниже $2800^\circ C$). MgO , газ (выше $3600^\circ C$)	Высшая 5930. Низкая —170	MgF_2 , твердый. MgF_2 , (выше $1263^\circ C$)	Высшая 10 700. Низкая 7200
Алюминий (Al) твердый	Al_2O_3 , твердый (ниже $2050^\circ C$). Al_2O_3 , газ (выше $2700^\circ C$)	Высшая 7400. Низкая 4130	AlF_3 , твердый (ниже $1040^\circ C$). AlF_3 , газ (выше $1280^\circ C$)	Высшая 13 200. Низкая 10 600
Бериллий (Be) твердый	BeO , твердый (ниже $2550^\circ C$). BeO , газ (выше $3900^\circ C$)	Высшая 15 900. Низкая —3100	BeF_2 , твердый (ниже $540^\circ C$). BeF_2 , газ (выше $1170^\circ C$)	Высшая 26 800. Низкая 20 800
Литий (Li) твердый	Li_2O , твердый, (ниже $1430^\circ C$). Li_2O , газ (выше $1700^\circ C$)	Высшая 10 300. Низкая 2880	LiF , твердый (ниже $850^\circ C$). LiF , газ (выше $1690^\circ C$)	Высшая 21 100. Низкая 11 450

лота сгорания керосина, бензина или другого вещества, горючими элементами которого являются углерод и водород, при сжигании в газообразном кислороде или в воздухе может быть определена по его элементному составу и известной из справочников полной энталпии i_r (равной при $20^\circ C$ теплоте образования из простых веществ):

$$H_u = 7850 [C]_r + 28 700 [H]_r + i_r, \quad (1.5)$$

где $[C]_r$ и $[H]_r$ — содержание углерода и водорода в 1 кг горючего [$\text{кг}/\text{кг}$].

Вместо прибавления энталпии или теплоты образования может быть вычтена теплота разложения $Q_{\text{разл}}$ на простые вещества ($Q_{\text{разл}} = -i_r$).

Пример. Теплотворность керосина, 1 кг которого содержит 0,86 кг углерода и 0,14 кг водорода, а полная энталпия $i_r = -450$ ккал/кг согласно (1.5) составляет $H_u = 7850 \cdot 0,86 + 28 700 \cdot 0,14 - 450 = 10 350$ ккал/кг.

Чем больше водорода содержится в топливе, тем выше теплота его сгорания. Так, парафиновые углеводороды C_nH_{2n+2} , которые содержат в 1,5—2 раза больше водорода, чем ароматические, обладают существенно более высокой теплотворностью. Если топливо содержит бор и металлы, то к формуле (1.5) соответственно добавляется 14 000 [B]_г; 7400 [Al]_г и т. д. (весовая доля каждого элемента умножается на его теплотворность). Если окислителем является фтор, то в выражение, аналогичное формуле (1.5), подставляются значения теплотворности горючих элементов при взаимодействии со фтором, приведенные в табл. 2. Теплота сгорания некоторых углеводородов, углеводородных топлив и горючих компонентов ракетного топлива, рассчитанная по формуле (1.5), приведена в табл. 3 [16, 27, 55, 73, 81, 86].

Эндотермичные вещества

Существуют сложные вещества, при образовании которых из атомов выделяется (отводится) меньше тепла, чем затрачивается (подводится) для разрушения молекул простых веществ на атомы. Следовательно, образование такого рода сложных веществ из простых сопровождается не выделением тепла, как обычно, а поглощением тепла; поэтому их называют *эндотермичными*. Полная энталпия таких веществ в стандартных условиях согласно принятому правилу знаков положительная (см. табл. 3), а теплотворность выше, чем суммарная теплота сгорания содержащегося в нем количества горючих элементов (рис. 3) [16, 39, 73].

Другие энергетические эффекты

Для *криогенных*¹ топлив (ожиженных газов) — жидкого аммиака и жидкого водорода — полная энталпия и теплота сгорания рассчитаны не для 20° С, а для температуры кипения. Определение полной энталпии для нестандартной температуры состоит в добавлении к стандартной энталпии (теплоте образования) энергетических эффектов охлаждения газообразного вещества от 20° С до температуры кипения $q = C_p t_{\text{кип}} - C_p \cdot 20$ (для аммиака эта величина равна —25 ккал/кг, для водорода —860 ккал/кг), конденсации в жидкость (для аммиака —327 ккал/кг, для водорода —108 ккал/кг) и других изменений состояния вещества, если они есть при охлаждении. В частности, равновесное состояние газообразного водорода при 20° С соответствует содержанию 75% ортоводорода (вращение протонов обоих атомов в молекуле H₂ происходит в одинаковом направлении) и 25% параводорода (вращение протонов обоих атомов в молекуле H₂ в противоположных направлениях), а при температуре кипения равновесным является почти чистый (99,8%) параводород. Полная теплота орто-параперехода —168 ккал/кг, а для 0,75 кг водорода, участвующего в этом переходе, она составляет 0,75 (—168) = —126 ккал/кг.

¹ Термин *криогенные* образован от греческих слов *криос* — холод, *генос* — рождение, т. е. буквально значит «рожденные холодом».

Таблица 3

ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ И НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ТОПЛИВ И ГОРЮЧИХ КОМПОНЕНТОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА¹ [86]

Топлива и горючие компоненты	Полная энталпия при 20° С, ккал/кг	Теплота сгорания (расчетная), ккал		Плотность при 20° С, кг/л	Гемпература, °С	
		кг горючего	окисление кислородом (O ₂)		кипения	замерзания
		окисление фтором (F ₂)				
<i>Углеводороды.</i>						
Парафиновые (C _n H _{2n+2} ; n = 5÷18)	-500 ²	10 500 ²	25 000 ²	0,66—0,75	36—220	-130÷+18
Нафтины, олефины (C _n H _{2n} ; n = 5÷18)	-400 ²	10 400 ²	24 500 ²	0,74—0,80	50—220 ²	-93÷+6
Ароматические (C _n H _{2n-6} ; n = 7÷10)	-150 ²	9800 ²	22 800 ²	0,86—0,88	100—200	-95÷+13
Бензины, керосины (C _n H _m)	420÷460 ²	10 350	24 300	0,72—0,85	40—300	-60 ²
Каучук бутадиенстирольный (C ₁₂ H ₁₄) _x	+520 ²	10 200 ²	22 900 ²	—	—	—
Метан (CH ₄) жидкий (при -162° С)	-1260 ³	11 820	27 600	0,424 ³	-162	-182
<i>Кислородсодержащие горючие:</i>						
Метиловый спирт (CH ₃ OH)	-1780	4750	13 100	0,791	65	-98
Этиловый спирт (C ₂ H ₅ OH)	-1450	6380	16 500	0,789	78	-114
Каучук полисульфидный (C ₄ H ₈ OS ₄) _x	+1000 ²	5600 ²	8000 ²	—	—	—
<i>Азотсодержащие горючие и составные части твердого топлива.</i>						
Аммиак (NH ₃) жидкий (при -33° С)	-990 ³	4060	10 300	0,682 ³	-33	-78
Гидразин (N ₂ H ₄)	+380	3970	8420	1,008	144	+2
Метилгидразин (CH ₃ N ₂ H ₃)	+280	6090	13 500	0,876	88	-52
Диметилгидразин (CH ₃) ₂ N ₂ H ₂	+190	7140	16 100	0,792	63	-57
Триэтиламин (C ₂ H ₅) ₃ N	-395	9460	22 200	0,729	90	-114
Ксилидин (CH ₃) ₂ C ₆ H ₃ NH ₂	-380	9160	21 600	0,978	212	-54

¹ Молекулярная масса и элементный состав приведены в табл. 1.² Приближенные данные.³ При температуре кипения.

Топлива и горючие компоненты	Полная энталпия при 20° С, ккал/кг	Теплота сгорания (расчетная), ккал		Плотность при 20° С, кг/л	Гемпература, °С	
		кг горючего	окисление кислородом (O ₂)		кипения	замерзания
Каучук полиуретановый [NHCOO(CH ₂) ₆] _x	+50	7250	16 700	—	—	—
Нитроцеллюлоза [C ₇ H ₆ O ₂ (OH) ₁₋₂ ·(ONO ₂) ₂₋₃] _x	-590	1025	—	1,66	—	—
Нитроглицерин C ₃ H ₆ (ONO ₂) ₃	-400	1490 ⁴	—	1,58	—	+13,2
<i>Борсодержащие горючие:</i>						
Пентаборан (B ₅ H ₉)	+150	16 000 ⁵	30 700	0,63	62	-47
Декаборан (B ₁₀ H ₁₄)	-170	15 400 ⁵	29 700	0,92	219	+99
<i>Водород жидкий (H₂ при -253° С):</i>						
Нормальный водород (0,75 орто+0,25 пары)	-950 ³	27 750	63 300	0,071 ³	-263	-259
Параvodород	-1200 ³	27 500	63 100	—	—	—

³ При температуре кипения.

⁴ Без потребления извне.

⁵ При образовании борного ангидрида в жидким виде.

Теплота сгорания смесей, состоящих из химически не связанных между собой компонентов, может быть подсчитана по формуле

$$H_{\text{см}} = aH_a + bH_b + cH_c + \dots + Q_{\text{раств}} \quad (1.6)$$

где *a*, *b*, *c* — доли компонентов в смеси (кг/кг топлива);

H_a, *H_b*, *H_c* — теплотворность компонентов;

Q_{раств} — теплота растворения (для реальных топлив она обычно пренебрежимо мала).

Вода, содержащаяся в некоторых топливах, отнимает на свое испарение около 600 ккал/кг. Следовательно, ее расчетная «теплотворность» выражается числом —600 ккал/кг. Полная энталпия при 20° С для парообразной воды —3210 ккал/кг, а для жидкой —меньше на 600 ккал/кг, т. е. приблизительно —3800 ккал/кг [9, 39, 67].

Теплотворность горючей смеси

Теплота сгорания в расчете на 1 кг горючей смеси (или на 1 кг ракетного топлива, содержащего горючее и окислитель) определяется по теплотворности горючего, окислителя и их соотношению. В простейшем случае, когда окислителем является воздух и тепловой эффект окислителя равен нулю, теплотворность смеси

при коэффициенте избытка окислителя $\alpha \geqslant 1$ (т. е. при полном окислении горючего) выражается формулой

$$h_\alpha = \frac{H_u}{1 + \alpha l_0}. \quad (1.7)$$

С увеличением избытка воздуха количество тепла, сообщаемого 1 кг продуктов сгорания, уменьшается (рис. 4, область бед-

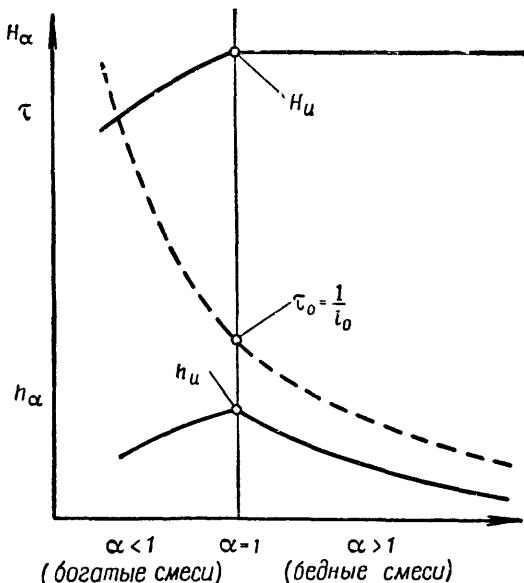


Рис. 4. Влияние состава смеси на теплоту сгорания горючего H_α и топлива h_α (штрихами показано изменение доли горючего в смеси $\tau = \frac{G_r}{G_b}$)

ных смесей). В области богатых смесей горючее окисляется не полностью, выделение тепла $H_\alpha < H_u$ и, несмотря на уменьшение количества окислителя αl_0 , тепловыделение h_α в расчете на 1 кг продуктов сгорания также уменьшается. Конкретный закон изменения h_α в области богатых смесей зависит от состава топлива. В очень богатой или очень бедной смеси из-за низкого тепловыделения пламя распространяться не может [1, 97].

ТОПЛИВО КАК ИСТОЧНИК РАБОЧЕГО ТЕЛА

Роль рабочего тела

Газообразные продукты сгорания служат рабочим телом, с помощью которого в двигателе тепловая энергия превращается в механическую. Образование большего объема газов (отсутствие кон-

денисированных продуктов сгорания) обеспечивает более высокую скорость их истечения из сопла двигателя и, следовательно, большую тягу. При одной и той же теплотворности выгоднее топлива, продукты сгорания которых имеют более низкую температуру. Это снижает частичный распад продуктов сгорания (диссоциацию), поглощающий тепло и ухудшающий экономичность двигателя, а также уменьшает опасность разрушения материалов горячей части двигателя [55, 72, 100].

Газообразование

Под газообразованием понимается приведенный к нормальным условиям (760 мм рт. ст., 0°С) объем газов, образуемый при сгорании 1 кг топлива ($v_{газ}$). Его можно подсчитать, зная, что 1 кг-моль любого газа при нормальных условиях имеет объем 22 415 л и, следовательно, объем 1 кг газа в нормальных литрах (нл), приведенных к условиям 760 мм рт. ст. и 0°С, равен

$$v_{газ} = \frac{22\,415}{\mu}. \quad (1.8)$$

Таблица 4

ГАЗООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СГОРАНИИ ВАЖНЕЙШИХ ГОРЮЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ, НОРМАЛЬНЫЙ ОБЪЕМ НЕКОТОРЫХ ГАЗОВ И КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛА, ВЫДЕЛЯЕМОЕ НА 1 нл ГАЗОВ (БЕЗ УЧЕТА ДИССОЦИАЦИИ) [9, 81, 100]

Химический элемент	Продукт сгорания или газ, содержащийся в продуктах сгорания	Молекулярная масса	Объем в нормальных литрах (760 мм рт. ст., 0°С)		Количество тепла, выделяемого на 1 нл газа, ккал
			1 кг продуктов сгорания	газа, образуемого после сгорания из 1 кг элемента	
Углерод (C)	Углекислый газ (CO ₂)	44,01	509	1865	4,22
	Окись углерода ¹ (CO)	28,01	800	1865	1,18
	Четырехфтористый углерод (CF ₄)	88,01	255	1865	9,82
Водород (H)	Водяной пар (H ₂ O)	18,02	1243	11120	2,59
	Фтористый водород (HF)	20,01	1119	22230	2,89
	Водород ¹ (H ₂)	2,02	—	11120	—
Азот (N)	Азот (N ₂)	28,02	—	800	—
	Кислород (O ₂)	32	—	701	—
Бор (B)	Борный ангидрид (B ₂ O ₃), газ	69,64	322	1035	8,9
	Фторид бора (BF ₃)	67,82	330	2070	12,0

¹ При неполном сгорании топлива (например, при $\alpha < 1$).

² При избытке окислителя ($\alpha > 1$).

В таблице 4 дан подсчитанный по формуле (1.8) нормальный объем 1 кг важнейших газов, которые могут содержаться в продуктах сгорания [14]. Там же приведен объем газа, получаемый при сгорании 1 кг горючих элементов.

Из табл. 4 видно, что водород при сгорании образует значительно больший объем газов, чем угле-

Таблица 5

ГАЗООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СГОРАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ
И КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛА, ВЫДЕЛЯЕМОЕ НА 1 м³ ГАЗА
(БЕЗ УЧЕТА ДИССОЦИАЦИИ) [9, 81, 100]

Горючее вещество	С кислородом			С фтором		
	Газообразование в м ³ (760 мм рт. ст., °C)	Количество тепла, выделяемое на 1 м ³ газа, ккал	из 1 кг горючего	Газообразование в м ³ (760 мм рт. ст., °C)	Количество тепла, выделяемое на 1 м ³ газа, ккал	из 1 кг горючего
<i>Углеводороды:</i>						
Парафиновые (C_nH_{2n+2})	3400	760	3,09	5015	540	4,14
Нафтены, олефины (C_nH_{2n})	3190	720	3,26	4780	520	4,72
Ароматические (C_nH_{2n-6})	2790	665	3,51	3900	450	4,82
Бензины	3160	720	3,28	4720	520	4,06
Керосины	3160	720	3,16	4720	520	4,03
Метан (CH_4) жидкий	4200	843	2,81	7015	592	4,67
<i>Спирты:</i>						
Метиловый (CH_3OH)	2440	980	1,94	2785	610	4,70
Этиловый (C_2H_5OH)	2660	860	2,40	3370	565	4,90
<i>Азотсодержащие горючие:</i>						
Аммиак (NH_3)	2620	1010	1,50	4580	1050	2,25
Гидразин (N_2H_4)	2090	1045	1,90	3480	1030	2,42
Диметилгидразин $N_2H_2(CH_3)_2$	2610	840	2,73	4090	680	3,94
Триэтиламин [$N(C_2H_5)_3$]	3090	755	3,06	4740	570	4,48
Ксилидин $C_6H_5NH_2(CH_3)_2$	2740	680	3,35	4230	515	5,09
<i>Борсодержащие горючие:</i>						
Пентаборан (B_5H_9)	2460	830	4,92 ¹	4920	865	6,23
Декаборан ($B_{10}H_{14}$)	2190	795	5,26 ¹	4350	840	6,82
<i>Водород (H_2) жидкий:</i>						
Нормальный водород	11 120	1243	2,49	22 230	1119	2,85
Параводород	11 120	1243	2,47	22 230	1119	2,83

¹ При образовании борного ангидрида в газообразном состоянии.

род. Высококипящие продукты сгорания металлов на выходе из двигателя, по-видимому, будут твердыми или жидкими (газообразование равно нулю). Тепло, выделенное при их образовании, пойдет на нагрев газообразных продуктов сгорания других элементов.

Для топлив сложного состава (табл. 5) газообразование вычисляется по составляющим их элементам. Оно имеет особенно важное значение для ракетных двигателей, так как их рабочее тело состоит целиком из продуктов сгорания топлива, а в воздушно-реактивных двигателях — более чем на 70% из азота воздуха. Из табл. 4 и 5 видно, что наибольшее газообразование (в расчете на 1 кг смеси) после водорода дают аммиак и гидразин, затем диметилгидразин и спирты [72, 73, 81].

Температура продуктов сгорания

Уравнение теплового баланса (уравнение энталпий) позволяет оценить влияние газообразования на конечную температуру газа t_r . Например, для 1 кг топлива и l кг воздуха¹ при $\alpha \geq 1$

$$(1 + l) (C_{p_r}^r t_r - C_{p_r}^0 t_0) = \xi H_u + l (C_{p_v}^B t_v - C_{p_v}^0 t_0) + (C_t^r t_t - C_t^0 t_0), \quad (1.9)$$

где

H_u — теплотворность топлива;

ξ — коэффициент полноты сгорания (обычно 0,95—0,98);

$t_0 = 20^\circ\text{C}$ — температура, при которой определяется теплотворность топлива;

t_v и t_t — исходные температуры воздуха и топлива, $^\circ\text{C}$;

C_{p_r} и C_{p_v} — средние теплоемкости (при постоянном давлении) продуктов сгорания и воздуха, а C_t — топлива для температуры, указанной верхним индексом (берутся по таблицам).

Состав продуктов сгорания определяется по составу топлива.

При $\alpha = 1$ (т. е. $l = l_0$), исходной температуре $t_v = t_t = 20^\circ\text{C}$ и $\xi = 1$ из выражения (1.9) температура t_r определяется следующим образом:

$$t_r = \frac{H_u}{C_{p_r}^r (1 + l_0)} + \frac{C_{p_r}^0 t_0}{C_{p_r}^r} \approx \frac{H_u}{C_{p_r}^r (1 + l_0)} \quad (1.9')$$

(так как второй член составляет около 1% от величины t_r). Знаменатель несложным путем выражается через объем газа $v_r^{\text{гор}} = \frac{22415}{\mu} (1 + l_0)$, получаемый в результате окисления 1 кг горючего, и теплоемкость 1 кмл газа $C_p^{\text{нл}} = \frac{C_{p_M}}{22415}$ (где C_{p_M} — молярная теплоемкость):

$$C_{p_r}^r (1 + l_0) = \frac{C_{p_M}}{\mu} (1 + l_0) = \frac{C_{p_M}}{22415} \cdot \frac{22415}{\mu} (1 + l_0) = C_p^{\text{нл}} v_r^{\text{гор}}.$$

Из этого следует, что

$$t_r \approx \frac{H_u}{C_p^{\text{нл}} v_r^{\text{гор}}}.$$

Разница в газообразовании при сгорании топлива различного состава более резкая, чем в теплотворности топлива и объем-

¹ Аналогично тепловой баланс может быть составлен для любых окислителей и горючих.

ной теплоемкости, которая мало отличается для различных газов. Поэтому влияние газообразования на температуру продуктов сгорания часто оказывается решающим. Чем больше газообразование, тем меньше тепла получит каждый нормальный литр газа, тем ниже температура газа. Так, топлива, содержащие больше водорода, благодаря большему газообразованию дают более низкую температуру сгорания, что благоприятно оказывается на работе двигателя. Поэтому, например, парафиновые углеводороды (C_nH_{2n+2}) имеют более низкую температуру сгорания (на 50—100°C и ниже), чем ароматические (C_nH_{2n-6}). Это особенно важно при увеличении теплотворности топлива, так как позволяет получить прирост полезной работы (удельной тяги) непосредственно за счет увеличения объема (газовой постоянной) рабочего тела, а не путем повышения температуры газа, которое вызывает снижение к. п. д. из-за диссоциации продуктов сгорания [73, 77].

Термическая диссоциация

При высоких температурах (выше 1800—2000°C) в газообразных продуктах сгорания возникают химические процессы, которые идут с поглощением тепла. Это процесс частичного распада (диссоциации) окислов CO_2 и H_2O на простые вещества, радикалы и атомы, а также эндотермические реакции обмена.

Реакция	Затрата тепла, ккал/кг	Реакция	Затрата тепла, ккал/кг
$CO_2 \rightarrow CO + 0.5O_2$	1540	$H_2 \rightarrow H + H$	6050
$CO \rightarrow C + 0.5O_2$	1060	$N_2 \rightarrow N + N$	51 300
$H_2O \rightarrow H_2 + 0.5O_2$	3220	$N_2 + O_2 \rightarrow 2NO \rightarrow$	360
$H_2O \rightarrow OH + 0.5H_2$	570	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	220
$O_2 \rightarrow O + O$	3640		

Чем выше температура продуктов сгорания, тем больше потери тепла на диссоциацию и реакции обмена. Снижение теплового эффекта сгорания топлива из-за диссоциации может быть очень значительным, особенно при низких давлениях (десятки процентов). Большее газообразование, обеспечивающее более низкую температуру газов, способствует уменьшению диссоциации и позволяет лучше использовать тепловую энергию топлива (рис. 5). При соответственно одинаковой температуре меньше поддаются диссоциации двухатомные молекулы (CO , NF , N_2 и др.), больше—трехатомные (CO_2 , H_2O) и особенно многоатомные (например, CF_4 , B_2O_3).

По одной лишь теплотворности можно получить ложное представление об эффективности топлива. Так, азотсодержащие ракетные горючие, например гидразин и диметилгидразин, с невысокой теплотворностью благодаря низкомолекулярным (малое μ) и низкоатомным (с малым числом атомов в молекуле) продуктам сго-

рания обеспечивают с одним и тем же окислителем получение более высокой удельной тяги, чем горючие с большей теплотворностью (например, керосин), образующие высокомолекулярные газы (см. табл. 10).

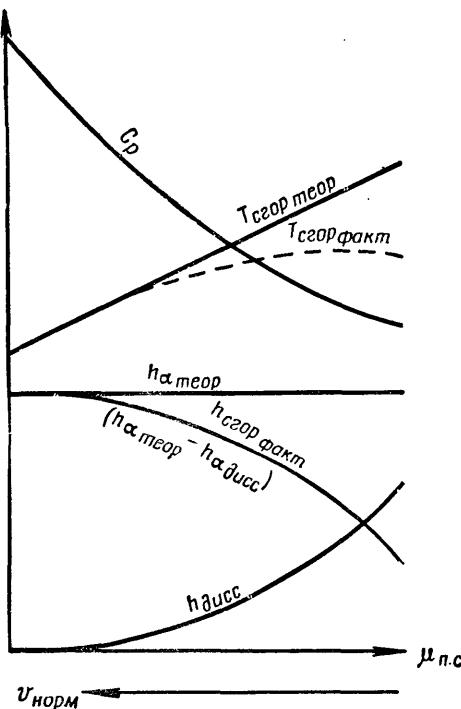


Рис. 5. Схема влияния молекулярной массы продуктов сгорания на их температуру, потерю тепла из-за диссоциации и на теплоту, выделяемую в камере сгорания

Таким образом, теплотворность характеризует располагаемую энергию топлива, а термодинамические свойства продуктов сгорания — возможность ее использования для производства механической работы и создания тяги [9, 55, 81, 86].

ТОПЛИВО КАК ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСА ТЯГИ

Единичный импульс

Двигатель летательного аппарата за счет сжигания топлива создает импульс силы тяги, который в процессе полета уравновешивается импульсами сил гравитационного поля и аэродинамического сопротивления и изменением количества движения летательного аппарата. Возможность реализации той или иной программы полета зависит от потребного расхода импульса на подъем, разгон, развороты, горизонтальный полет и от располагаемого импульса тяги, который

определяется бортовым запасом топлива G_t и тяговой эффективностью каждого килограмма топлива. За счет 1 кГ веса топлива двигателем создается *единичный импульс*

$$I_t = \frac{P\tau_1}{G_t} [\text{сек}],$$

где P — сила тяги;

τ_1 — время ее действия при расходе 1 кГ веса топлива.

Единичный импульс равен тяге двигателя, деленной на секундный расход топлива $\frac{dG_t}{d\tau}$:

$$I_t = \frac{P}{\frac{dG_t}{d\tau}} \left[\frac{\text{кГ}}{\text{сек}} \right]. \quad (1.10)$$

Единичный импульс имеет размерность времени и физически представляет собой время в секундах, в течение которого 1 кг топлива обеспечивает получение 1 кГ тяги двигателя, или же время, за которое расходуется вес топлива, численно равный силе тяги. Чем больше I_t , тем больше располагаемое время $\tau_{\text{расп}} = I_t \frac{G_t}{P}$ работы двигателя с тягой P при данном запасе топлива G_t .

Для ракетного топлива единичный импульс — это *удельная тяга* $I_t = P_{\text{уд}}$. Она является общепринятой энергетической характеристикой ракетного топлива. В воздушно-реактивном двигателе единичный импульс топлива является параметром, обратным удельному расходу топлива:

$$I_t = \frac{1}{G_t \text{сек}/P} = \frac{1}{C_{\text{уд}} \text{сек}} = \frac{3600}{C_{\text{уд}} \text{час}}. \quad (1.11)$$

Величина $C_{\text{уд}}$ обратно пропорциональна теплотворности топлива, следовательно, $I_t \sim H_u$. Таким образом, единичный импульс топлива является тягой в m эквивалентом его энергетических свойств при работе любого двигателя в полете [38, 55].

Располагаемый импульс топлива

По мере расходования топлива полетный вес уменьшается. За элемент времени $d\tau$ уменьшение веса $-dG = dG_t$, а элементарный импульс силы тяги, отнесенный к единице мгновенного веса летательного аппарата:

$$dI_t = \frac{P d\tau}{G} = \frac{I_t dG_t}{G} = -I_t \cdot \frac{dG}{G}.$$

Суммарный импульс, сообщаемый единице переменного веса летательного аппарата за полное время τ работы двигателя в полете, в течение которого полетный вес летательного аппарата уменьшается от начального G_h до конечного $G_k = G_h - G_t$:

$$I_t = - \int_{G_h}^{G_k} I_t \frac{dG}{G} = I_t \ln \frac{G_h}{G_k} = I_t \ln \mathbb{Q}, \quad (1.12)$$

где $\mathbb{Q} = \frac{G_h}{G_k}$ — число Циолковского.

В. С. Пышнов называет величину I_t *располагаемым импульсом топлива*. Формула (1.12) представляет собой приложение знаменитой формулы Циолковского, выведенной им для определения максимальной скорости ракеты, к определению характеристик любого летательного аппарата [76].

Влияние плотности топлива

Число Ц и, следовательно, располагаемый импульс топлива в некоторых случаях зависит от плотности топлива ρ_t . При полной заправке топливных емкостей V_t с увеличением плотности топлива ρ_t соответственно возрастает его вес $G_t = V_t \rho_t$. Если задан начальный полетный вес G_h , то ценой сокращения полезного груза $G_n = G_h - G_0 - V_t \rho_t$ (G_0 — вес конструк-

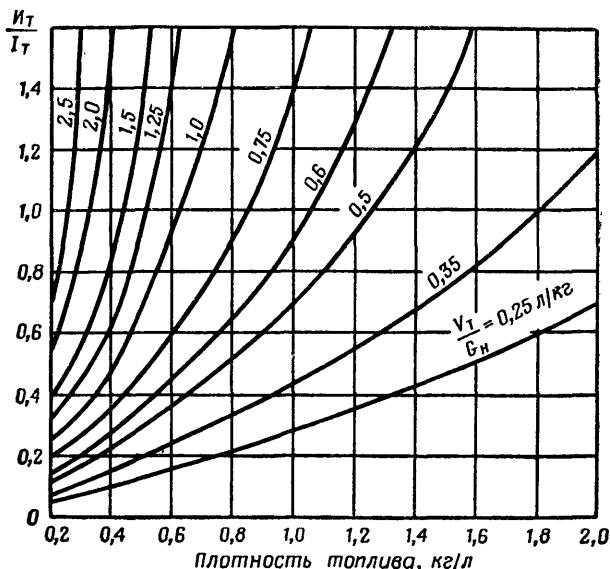


Рис. 6. Влияние плотности топлива на импульс тяги, сооб-
щающий единице веса летательного аппарата, при соотв-
тственно равных начальном полетном весе и удельной тяге
двигателя ($\frac{V_t}{G_h}$ — емкость топливных баков, приходящаяся на
единицу начального полетного веса)

ции, экипажа и оборудования) число Ц и располагаемый импульс топлива увеличиваются:

$$\text{Ц} = \frac{G_h}{G_h - V_t \rho_t} = \frac{1}{1 - \frac{V_t}{G_h} \rho_t};$$

$$I_t = I_t \ln \frac{1}{1 - \frac{V_t}{G_h} \rho_t}. \quad (1.13)$$

Влияние плотности топлива в этом случае тем резче, чем выше плотность и чем больше емкость баков, приходящаяся на единицу начального полетного веса летательного аппарата (рис. 6).

Это объясняется тем, что с увеличением веса топлива уменьшаются конечный вес летательного аппарата и тяга, потребная в конце полета. Соответственно уменьшается километровый расход топлива, что обеспечивает увеличение дальности полета. В случае одинаковой тяги будет нара-
стать скорость или высота полета и т. д.

Влияние плотности получается менее резким, если стоит задача полета с одинаковым полезным грузом, а начальный полетный вес $G_n = G_0 + G_n + V_{tr}$ зависит от запаса топлива:

$$\Pi = \frac{G_0 + G_n + V_t \rho_t}{G_0 + G_n} = 1 + \frac{V_t}{G_0 + G_n} \rho_t;$$

$$I_t = I_t \ln \left(1 + \frac{V_t}{G_0 + G_n} \rho_t \right). \quad (1.14)$$

В случае же одинакового веса топлива ($G_t = \text{const}$) его плотность, разумеется, не оказывает никакого влияния на располагаемый импульс и полетные возможности летательного аппарата [55, 73].

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Качество топлива определяется не только его энергетическими характеристиками, но и такими физическими свойствами, как плотность, вязкость, испаряемость, замерзание, а также такими химическими свойствами, как стабильность, коррозионная активность и др. Для керосинов и бензинов, энергетические характеристики которых почти одинаковы, физико-химические свойства играют решающую роль при определении возможности и условий применения. Нормы на показатели физико-химических свойств каждого топлива установлены ГОСТ или техническими условиями.

Плотность

Плотностью называется масса вещества, заключенная в единице его объема. Поскольку масса 1 л воды при 4°С точно равна 1 кг, численное значение плотности, выраженное в кг/л (г/мл), равно отношению массы (или веса) какого-либо объема вещества к массе (или весу) такого же объема воды, имеющей температуру 4°С. В практике плотностью топлив, масел и технических жидкостей обычно называют безразмерную величину этого отношения. Ее обозначают ρ_t^t (где t — температура продукта, при которой определена его плотность, а 4 — температура воды в °С, по отношению к которой выражена плотность). Она численно равна удельному весу топлива в технической системе единиц. Рассматривая плотность как весовую, по объему V_t и плотности ρ_t^t (замеренных при одной и той же температуре t) находят вес топлива $G_t = V_t \rho_t^t$.

При повышении температуры плотность топлив уменьшается, а при понижении — увеличивается. При изменении температуры на Δt изменение плотности $\Delta \rho = -\gamma \Delta t$, где γ — температурная поправка плотности данного вещества на 1°С. Для нефтепродуктов $\gamma \approx 0,0005—0,0009$ (табл. 6).

Таблица 6

СРЕДНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОПРАВКИ ПЛОТНОСТИ
НЕФТЕПРОДУКТОВ НА 1° С (γ)

Плотность	Поправка	Плотность	Поправка
0,6900—0,6999	0,000910	0,8500—0,8599	0,000699
0,7000—0,7099	0,000897	0,8600—0,8699	0,000686
0,7100—0,7199	0,000884	0,8700—0,8799	0,000673
0,7100—0,7299	0,000870	0,8800—0,8899	0,000660
0,7300—0,7399	0,000857	0,8900—0,8999	0,000647
0,7400—0,7499	0,000844	0,9000—0,9099	0,000633
0,7500—0,7599	0,000831	0,9100—0,9199	0,000620
0,7600—0,7699	0,000818	0,9200—0,9299	0,000607
0,7700—0,7799	0,000805	0,9300—0,9399	0,000594
0,7800—0,7899	0,000792	0,9400—0,9499	0,000581
0,7900—0,7999	0,000778	0,9500—0,9599	0,000567
0,8000—0,8099	0,000765	0,9600—0,9699	0,000554
0,8100—0,8199	0,000752	0,9700—0,9799	0,000541
0,8200—0,8299	0,000738	0,9800—0,9899	0,000528
0,8300—0,8399	0,000725	0,9900—1,0000	0,000515
0,8400—0,8499	0,000712		

На рисунке 7 показана зависимость плотности некоторых топлив от температуры в пределах от -60°C до $+200^{\circ}\text{C}$ (плотность

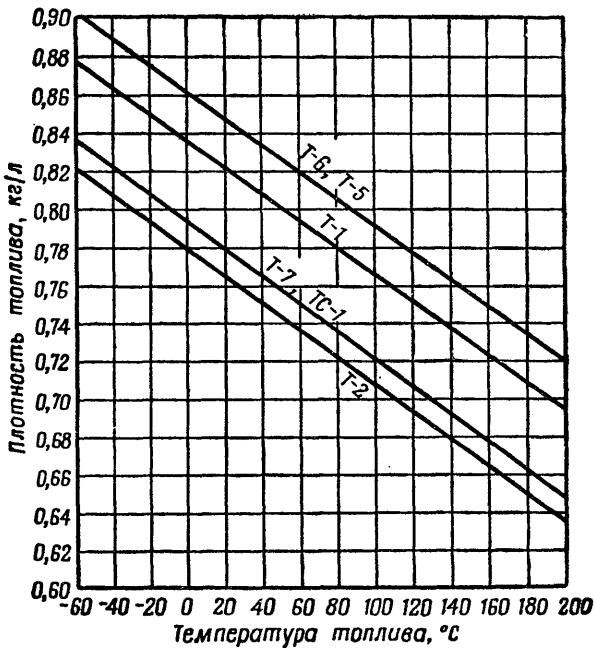


Рис. 7. Изменение плотности некоторых топлив в широком диапазоне температуры

при высокой температуре представляет интерес в связи с нагревом топлива при больших скоростях полета).

В технических условиях (стандартах) нормы на плотность установлены при 20°C (см. рис. 12). В паспортах, характеризующих качество топлива, плотность указывается также при температуре топлива 20°C . Если известна плотность ρ_4^t при другой температуре t , то по ее значению можно вычислить плотность при 20°C (т. е. привести фактическую плотность к стандартным условиям) по формуле

$$\rho_4^{20} = \rho_4^t + \gamma(t - 20). \quad (1.15)$$

В полевых условиях и войсковых лабораториях для измерения плотности применяют ареометр (рис. 8). Его равновесие согласно закону Архимеда достигается тогда, когда вес жидкости, вытесненной погруженной частью ареометра, равен собственному весу ареометра. Поэтому в более легкую жидкость он погружается глубже. Деление на стержне ареометра, совпадающее с верхним краем мениска жидкости, указывает ее фактическую плотность (обычная точность отсчета — три знака после запятой) [64].

Вязкость

Вязкостью называется свойство жидкости оказывать сопротивление при сдвиге или скольжении ее слоев. Вязкость — это внутреннее трение между частицами жидкости, обусловленное молекулярным сцеплением и обменом количества движения. Касательная сила внутреннего трения F , приходящаяся на единицу площади S при смещении одного слоя жидкости относительно другого (т. е. касательное напряжение жидкости), пропорционально поперечному градиенту скорости $\frac{dv}{dn}$:

$$\frac{F}{S} = \mu \frac{dv}{dn}. \quad (1.16)$$

Поперечный градиент скорости показывает ее изменение на единицу длины в направлении, поперечном направлению движения или вектору скорости (рис. 9); размерность его: $\frac{\text{м/сек}}{\text{м}} = \text{сек}^{-1}$.

Коэффициент пропорциональности μ , зависящий от природы жидкости, называется динамической вязкостью. Единица ее *пуаз* соответствует силе сопротивления в 1 дину, возникающей при взаимном перемещении слоев жидкости площадью 1 см^2 со ско-

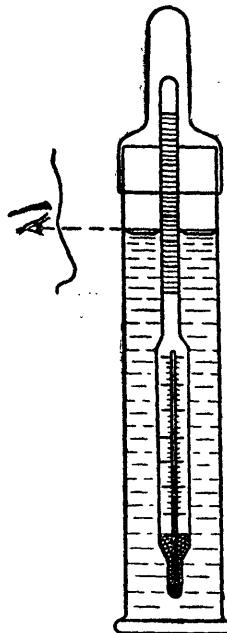


Рис. 8. Измерение плотности с помощью ареометра

ростью 1 см/сек, находящихся на расстоянии 1 см друг от друга (рис. 9). 1 пз = 1 дина · сек/ см^2 = $\frac{1}{98,1} \text{ кГ} \cdot \text{сек}/\text{м}^2 = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{сек}/\text{м}^2$.

Чем больше плотность жидкости, тем быстрее она течет при одинаковой динамической вязкости. Вязкостные свойства жидкости с точки зрения ее подвижности характеризуются *кинематической вязкостью*, равной отношению динамической вязкости жидкости к ее плотности (при соответственно одинаковой температуре):

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho_4}. \quad (1.17)$$

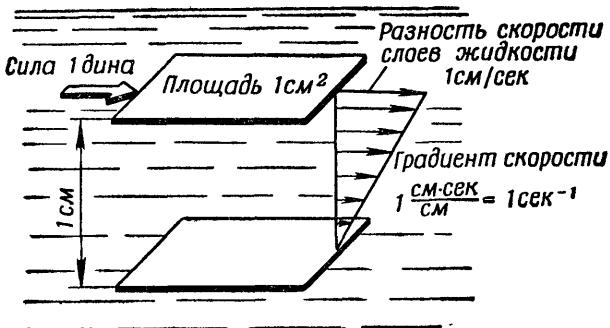


Рис. 9. Схема к определению понятия динамической вязкости и метрических единиц вязкости

Единица кинематической вязкости *стокс* (сокращенно *ст*) соответствует динамической вязкости в 1 пз при плотности 1 г/см³; 1 ст = 1 см²/сек. Обычно используется единица, в 100 раз меньшая, чем стокс, — *сантистокс* (сокращенно *сст*). Вязкостью в 1 сст обладает вода при 20,2° С.

Кинематическую вязкость в войсковых лабораториях определяют капиллярным вискозиметром по времени τ истечения определенного объема жидкости из пузырька вискозиметра через капилляр (рис. 10). Расчет производится по формуле $\nu = C\tau$, где C — постоянная вискозиметра, известная из его тарировки дистиллированной водой при 20,2° С ($C = \frac{1}{\tau_{\text{воды}}}$) или другой химически чистой жидкостью, вязкость которой точно известна.

Вязкость существенно изменяется при изменении температуры жидкостей. Поэтому нормы вязкости для каждого продукта устанавливаются стандартами и записываются в паспорт при определенной температуре испытания (для топлив обычно при 20° С); кинематическая вязкость при этой температуре обозначается ν_{20} . С понижением температуры жидкости ее вязкость возрастает тем резче, чем ниже температура [63, 64].

Испаряемость

Испаряемостью жидкости называется способность ее переходить в паро- и газообразное состояние. Она характеризуется давлением насыщенных паров, температурой кипения (для химически однородных жидкостей) и фракционным составом (для жидкостей

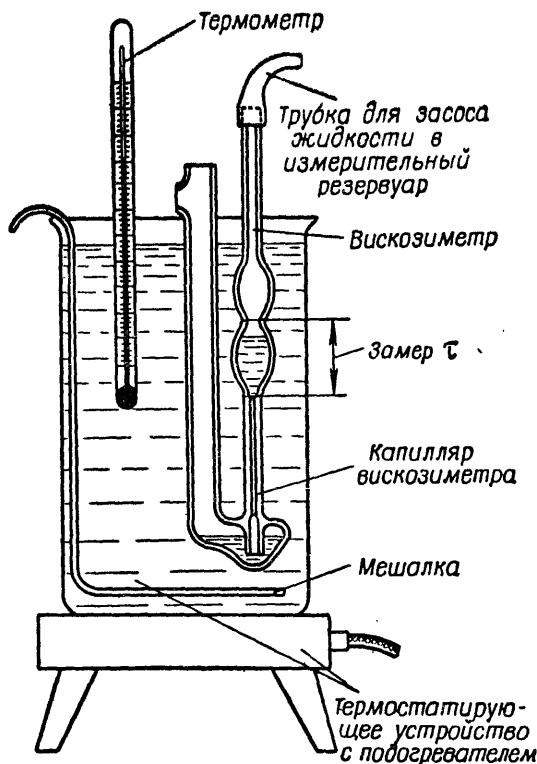


Рис. 10. Схема установки с капиллярным вискозиметром для определения кинематической вязкости

сложного состава). Кроме того, испаряемость оценивают по температуре вспышки.

Испарение происходит при любой температуре. Внутренний механизм его заключается в том, что наиболее быстрые молекулы жидкости преодолевают силы сцепления с соседними молекулами и вырываются за пределы жидкого тела. Чем выше температура, тем больше таких молекул. Если испарение идет в незакрытом объеме, то почти все молекулы, перешедшие в паровую фазу, удаляются от поверхности жидкости и обратно не возвращаются. Если же испарение идет в замкнутом пространстве, то из скопившихся паров часть молекул, ударяясь о поверхность

жидкости, попадает в нее вновь. При некотором количестве пара над жидкостью наступает насыщение, динамическое равновесие: число молекул, покидающих пределы жидкости, оказывается равным числу возвращающихся в нее молекул. Видимый процесс испарения прекращается, количество паров больше не увеличивается и, следовательно, устанавливается наибольшее давление, возможное при данной температуре. Эта максимальная величина давления называется *давлением насыщенного пара*. Его определяют при условной температуре 38°С по показанию манометра, присоединенного к специальному прибору, в котором происходит испарение. Топлива с более высоким давлением насыщенного пара быстрее испаряются, в частности, имеют лучшие пусковые качества. Однако при большом давлении насыщенных паров во всасывающих магистралях могут возникать паровые пробки, препятствующие прокачиванию топлива, а также могут быть значительные потери топлива из емкостей.

Чем выше температура, тем выше давление насыщенного пара, так как испарение идет более интенсивно и уравновешивается встречным процессом только при достаточно большом накоплении пара. Когда давление насыщенных паров достигает величины *внешнего (атмосферного) давления*, происходит *кипение* — интенсивный переход жидкости в пар не только с поверхности, но и внутри объема жидкости. Соответствующая температура называется *температурой кипения*. В процессе кипения температура химически однородной жидкости не изменяется, если давление над жидкостью постоянное. С понижением внешнего давления температура кипения становится ниже. Из-за этого, например, на большой высоте может закипать топливо в баках самолета. С повышением внешнего давления температура кипения возрастает. Это позволяет под высоким давлением хранить в жидком состоянии вещества, которые при обычном атмосферном давлении представляют собой газ (например, углеводородные газы, углекислота).

В процессе кипения нефтяного топлива, представляющего собой однородную смесь (раствор) химически различных веществ, температура не остается постоянной. Сначала испаряются преимущественно компоненты с высоким давлением насыщенного пара. У остающейся жидкости оно ниже, следовательно, кипение продолжается только при повышении температуры. Температура начала кипения топлива выше, чем у самого низкокипящего из входящих в него веществ. При испарении низкокипящие вещества увлекают за собой высококипящие, поэтому температура конца кипения оказывается ниже, чем у самого высококипящего вещества. Испаряемость такого топлива характеризуют *фракционным составом — температурами выкипания различных объемных долей (фракций) топлива*. Характерными точками фракционного состава обычно считаются температура начала кипения, температура выкипания 10%, 50%, 90% объема топлива и температура конца кипения (или выкипания 97,5—98% топлива).

ва). Они обычно нормируются стандартами и указываются в паспортах на топливо.

Фракционный состав определяют путем перегонки топлива (прибор изображен на рис. 11). График разгонки изображают в виде зависимости между процентной долей выкипевшей жидкости и температурой (рис. 12). Чем круче кривая разгонки, тем однороднее топливо. По фракционному составу контролируют правильность технологии производства топлива. В некоторых двигателях он отражается на эксплуатационных характеристиках топлива, в частности на полноте сгорания и склонности к нагарообразованию.

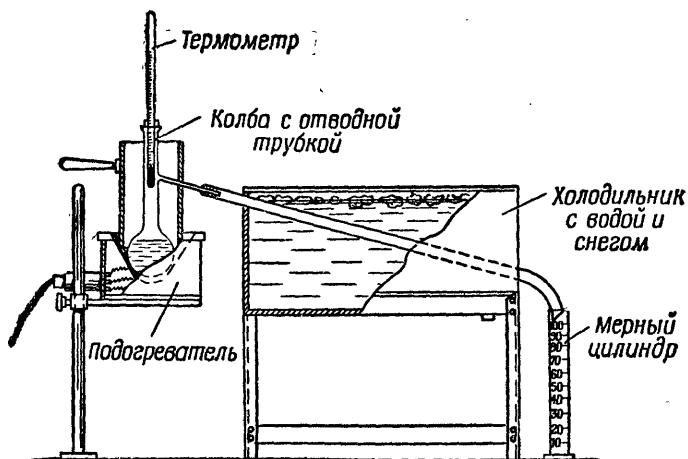


Рис. 11. Аппарат для определения фракционного состава топлива

Наряду с прямым измерением испаряемость топлива оценивают простым косвенным методом — по *температуре вспышки*. Топливо нагревается в закрытом тигле и пары его смешиваются с находящимся там воздухом. Пока их концентрация недостаточна, вспышки от горящего фитиля не происходит. Температурой вспышки называется минимальная температура, до которой нужно нагреть жидкость, чтобы пары над ее поверхностью вспыхнули от поднесенного к ней пламени. Чем она ниже, тем, следовательно, легче испаряется жидкость [39, 60, 64].

Замерзание

В охлаждаемой жидкости при некоторой температуре начинается кристаллизация. Если жидкость химически однородна, то ее кристаллизация идет при постоянной, характерной для нее температуре — *температуре замерзания*, несмотря на охлаждение (отвод тепла). Это объясняется выделением тепловой энергии при образовании кристаллов. Обычно температура замерзания совпа-

дает с температурой плавления кристаллов. Однако иногда происходит *переохлаждение* жидкости — кристаллизация начинается при температуре ниже температуры плавления кристаллов (иногда на несколько десятков градусов).

Топливо, составные части которого неограниченно растворимы друг в друге (например, смесь углеводородов), кристаллизуется не при постоянной температуре, а постепенно по мере понижения температуры. Вначале кристаллизуются вещества с высокой температурой замерзания, затем — с более низкой. При

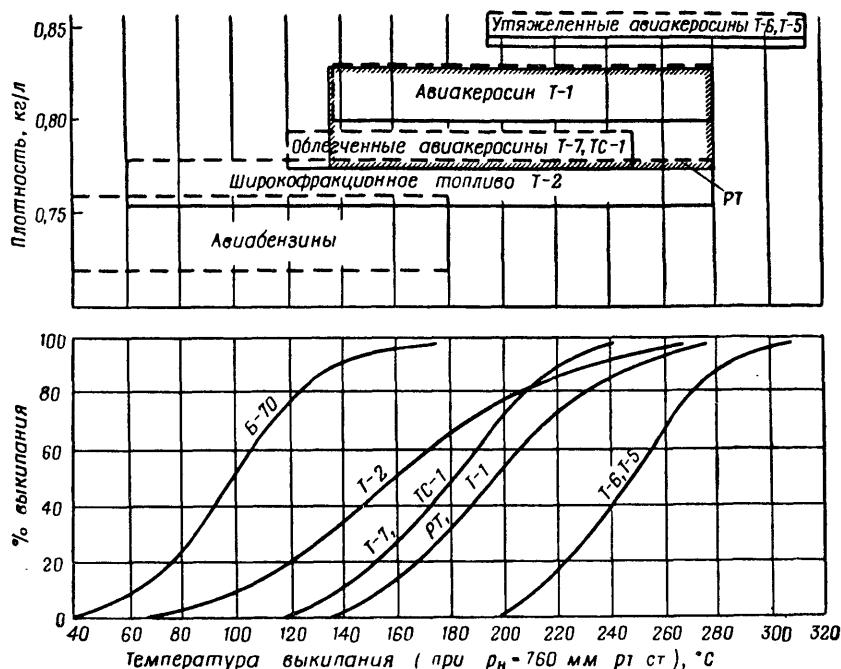


Рис. 12. Диапазоны плотности, пределы выкипания и кривые фракционного состава некоторых топлив

этом температура появления первых кристаллов ниже температуры замерзания самого легкозамерзающего из содержащихся в топливе веществ (тем ниже, чем его меньше). В низкозамерзающем топливе не опасно наличие небольшого количества углеводородов с высокой, даже положительной температурой замерзания (бензола, циклогексана) — в растворе они не кристаллизуются до низких температур.

Появление даже единичных кристаллов в топливе может привести к опасным последствиям. Поэтому принято определять *температуру начала кристаллизации*, при которой в процессе охлаждения топлива невооруженным глазом обнаруживаются первые кристаллы.

Составные части некоторых жидким растворов (например, окислителей четырехокись азота — азотная кислота, перекись водорода — вода) при переходе в твердое состояние оказываются нерасторимыми или ограниченно растворимыми один в другом. При некотором процентном составе температура замерзания такого раствора оказывается наиболее низкой (значительно ниже, чем температура замерзания каждого индивидуального вещества, входящего в раствор, см. рис. 31). Состав этот называется *эвтектическим*. Используя это свойство растворов, получают низкозамерзающие топлива и топливные компоненты из веществ, имеющих более высокую температуру замерзания [39, 60, 64].

Физическая однородность

Физически однородными считаются такие жидкые топлива, которые нельзя разделить на составные части механическим путем (отстаиванием, фильтрацией, центрифугированием). Элементами неоднородности топлива являются механические примеси, капельки воды или водная эмульсия, кристаллы льда (в виде взвешенных в топливе снежинок).

Механическими примесями в топливе являются твердые вещества, образующие осадок или находящиеся во взвешенном состоянии (пыль и технологическая грязь, продукты коррозии и фрикционного износа металлов, разрушения шлангов, прокладок и фильтров, окисления и разложения углеводородов и других органических веществ). Размеры частиц весьма разнообразны. В одном литре практически чистого топлива, поступающего на заправку самолетов, содержится порядка тысячи частиц размером около 25 мк , сотни тысяч частиц размером $5-25 \text{ мк}$, много миллионов еще более мелких частиц порядка $1-5 \text{ мк}$. При осмотре топлива, налитого в стеклянный цилиндр, глаз различает в ярком проходящем свете (при освещении сбоку) частицы размером не менее $25-30 \text{ мк}$. Надежно обнаруживаются частицы крупнее 50 мк . Вредными для топливной аппаратуры обычно считаются частицы, начиная с $5-10 \text{ мк}$, но не единичные, а в массе. Казалось бы, визуальный контроль механических примесей бесполезен. Однако это неверно, так как характер закона распределения частиц по размеру приблизительно сохраняется. Если в топливе оказываются частицы, видимые невооруженным глазом, это указывает на наличие недопустимо большого количества мелких, невидимых частиц.

Количественный контроль механических примесей в топливе производится путем фильтрации через нитроцеллюлозные фильтры, которые задерживают практически все частицы крупнее $0,5 \text{ мк}$. Считается безопасным содержание механических примесей в количестве $0,0002-0,0003\%$ ($2-3 \text{ г}$ в одной тонне топлива).

Вода, проникшая в топливо в результате растворения водяных паров из атмосферы (гигроскопичности топлива) или образования росы и инея в емкостях с топливом, может быть в раство-

ренном или нерастворенном виде. В углеводородных топливах избыток воды сверх предела растворимости достаточно надежно обнаруживается визуально. Топливо, содержащее нерастворенную воду в виде тонкой эмульсии, выглядит мутным; в дальнейшем в нем появляется водный отстой. Кристаллики замерзшей воды — тонкая суспензия льда — при просмотре цилиндра с топливом на свет хорошо заметны. Растворенная вода в топливе не видна, но она не нарушает физической однородности топлива. Количество ее определяется, если необходимо, путем реакции с гидридом кальция (CaH_2), в результате которой выделяется водород (его объем пропорционален содержанию воды). Большинство неуглеводородных компонентов ракетного топлива способно растворять воду в значительном количестве, в них вода не может быть источником физической неоднородности [60, 64, 85, 98, 99].

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ ТОПЛИВ

Химические процессы

Под химическими свойствами топлив подразумевается их склонность к химическому превращению в условиях, характерных для хранения и работы техники, а также к химическому взаимодействию с другими веществами, которые находятся в контакте с топливом. В отличие от физических свойств химические свойства связаны с изменением состава и строения молекул как самих топлив, так и веществ, с которыми они соприкасаются.

Важнейшими химическими процессами для жидкого топлива являются медленное окисление, разложение, полимеризация и уплотнение при обычных температурах (до применения) и при высоких температурах (при работе двигателей); коррозия металлов и неметаллических материалов (резины, пластмасс, тканей). В каждом диапазоне температур преобладают какие-то определенные химические процессы, а остальные остаются несущественными [63, 73].

Химическая стабильность

Способность топлива химически не изменяться и не вступать во взаимодействие с другими веществами (разумеется, до попадания в камеру сгорания) называется химической стабильностью. Совершенно стабильных топлив не существует, однако парафиновые, нафтеновые и в значительной степени ароматические углеводороды, из которых состоят нефтяные топлива, практически стабильны. Нестабильными являются непредельные углеводороды олефины, которые в большинстве нефтяных топлив содержатся в небольшом количестве (до 2,5 %), а также примеси гетероорганических соединений, в состав которых

кроме углерода и водорода входят сера, азот, кислород или другие элементы.

Непредельные углеводороды легко присоединяют кислород, полимеризуются и превращаются в органические кислоты, смолы и другие сложные органические соединения. При высоких температурах (порядка 150° С) вместе с другими гетероорганическими примесями они образуют твердые нерастворимые осадки. Содержание непредельных углеводородов при анализе топлива определяется по одному числу (весу йода в граммах, присоединяющемуся к непредельным углеводородам в расчете на 100 г топлива). Процент непредельных углеводородов в керосинах приблизительно равен 0,7 йодного числа, а в бензинах — 0,4 йодного числа.

Непосредственным показателем склонности топлива к смоловобразованию служит содержание в нем фактических смол — количества миллиграммов твердых или полутвердых нелетучих веществ, остающихся после выпаривания 100 мл топлива под струей воздуха или перегретого водяного пара (при нагреве до 180° С для керосина и до 150° С для бензина) [60, 64, 72].

Термическая стабильность

Химическую стабильность в условиях высоких температур называют термической стабильностью. Оценка ее производится в статических и динамических условиях. В статических условиях топливо испытывают в герметичных колбах при 150° С с пластинкой из фосфористой бронзы (при этом стандартные топлива дают максимум твердого осадка). Продолжительность испытания для одних топлив 4 часа, для других, более стабильных, — 5 часов. Отфильтрованный осадок определяется в миллиграммах на 100 мл топлива. Испытание в динамических условиях производится путем прокачки топлива, подогретого сначала в баке испытательной установки, затем в трубчатом элементе. Оценка производится по отложениям внутри трубчатого элемента и перепаду давления на фильтре. Несмотря на большое внимание к вопросам термостабильности, методы ее оценки в недостаточной степени характеризуют топлива применительно к реальным условиям [58, 60, 64, 72, 95].

Коррозионные свойства

Углеводороды, входящие в состав керосинов и бензинов¹, не обладают коррозионной активностью, носителями ее являются неорганические и гетероорганические примеси. Наиболее опасно наличие в топливе неорганических водорастворимых кислот и щелочей (которые могут остаться в топливе в результате плохой щелочной обработки и недостаточной промывки после защелачивания в процессе производства), нерастворенной воды, свободной

¹ О коррозионной активности компонентов ракетных топлив см. в гл. 5.

серы и сероводорода. Содержание их в углеводородных топливах недопустимо.

Водорастворимые кислоты и щелочи, а также вода, всегда практически содержащая некоторое количество растворенных солей, являются электролитами (электропроводными жидкостями) и представляют собой среду, в которой развивается электрохимическая коррозия металлов. В капельках электролитов, примыкающих к поверхности металла, которая всегда несколько неоднородна по составу, возникает разность потенциалов. Под ее действием от поверхности металла отрываются положительно заряженные ионы. При столкновении их с отрицательно заряженными ионами гидроксила OH или кислотных остатков образуются продукты коррозии. Поверхность металла становится неровной, в узлах трения топливной аппаратуры может произойти задир.

Осаждающиеся продукты коррозии засоряют фильтры, топливную аппаратуру, регулирующие устройства.

Водорастворимые кислоты и щелочи при контроле качества обнаруживаются при взбалтывании подогретого топлива вместе с подогретой водой (10:1) в делительной воронке (рис. 13). Водную вытяжку (нижний слой в воронке) спускают и проверяют индикаторами: метиловым оранжевым (в присутствии кислоты меняет желтый цвет на розовый) и фенолфталеином (в присутствии щелочи из бесцветного дается малиновым). Для надежной проверки отсутствия щелочных соединений рекомендуется приготовить 100 мл водной вытяжки встряхиванием с 300 мл топлива, а затем ввести индикатор и упарить водную вытяжку до 10 мл.

Органические кислоты, не полностью удаленные из топлива при его производстве и образующиеся в нем при длительном хранении, дают с медными и железными сплавами мыльный осадок. Кислотность топлива выражается количеством миллиграммов едкого кали (KOH), которое нейтрализует (превращает в мыла и другие соли) кислоты, содержащиеся в 100 мл топлива.

Свободная (элементарная) сера в топливе вызывает коррозию медных сплавов. Ее можно обнаружить испытанием на медной пластинке, которая на три часа погружается в топливо, нагретое до 50 или 100° С. При наличии серы шлифованная пластинка покрывается пятнами. Для реактивных углеводородных топлив не допускается никакого изменения цвета пластиинки. Сероводород, который также недопустим, обнаруживается специальным испытанием на свинцовую бумажку.

Из органических соединений серы наиболее опасны

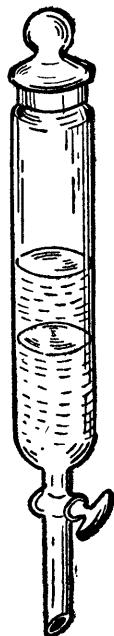


Рис. 13. Делительная воронка

меркаптаны (C_nH_mSH) — тяжелые жидкости с резким неприятным запахом. С цветными металлами они образуют слизистые осадки — меркаптиды. Меркаптаны особенно активны в условиях высокой влажности. Содержание меркаптановой серы в войсковых лабораториях определяют по количеству синего аммиачного раствора сернокислой меди, прореагировавшего с топливом (пока раствор не перестанет обесцвечиваться).

При этом выявляются не все меркаптаны. Точное определение производится потенциометрическим титрованием.

Другие соединения серы в топливах непосредственно не вызывают коррозию металлов. Но образующийся при их сгорании *сернистый газ* SO_2 при высокой температуре реагирует с металлами, а при охлаждении в смеси с кислородом воздуха и влагой может превратиться в коррозионноактивную серную кислоту ($SO_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$). Общее содержание серы находят в результате сжигания топлива и определения количества сернистого газа в продуктах сгорания.

Разрушению жаростойких сплавов, соприкасающихся с продуктами сгорания топлива, может способствовать наличие в топливе ничтожно малых количеств (тысячных долей процента) *ванадия, молибдена* и некоторых других металлов; источником их может быть как исходная нефть, так и применяемые в производстве топлива катализаторы. Окислы этих металлов служат катализаторами газовой коррозии.

Углеводороды могут вызывать набухание и со временем разрушение обычных («небензостойких») сортов резины и других материалов, из которых выполняются уплотнения. Они впитываются в микроскопические поры и медленно растворяют эти материалы; процесс размягчения и порчи их идет обычно сразу на значительную глубину. Особенно интенсивно действуют на резину и кожу ароматические углеводороды. Поэтому резиновые детали и уплотнения, применяемые в топливных системах, изготавливаются из специальных (маслостойких) сортов резины [64, 72, 116].

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТОПЛИВУ

Параметры и процессы, на которые влияет топливо

От качества топлива в той или иной степени зависят легкость запуска двигателя, быстрота прогрева и перехода на рабочий режим (приемистость), развиваемая двигателем тяга (или мощность), экономичность двигателя, устойчивость его работы, надежность в течение установленного ресурса (срока службы). При любых эксплуатационных условиях топливо должно возможно лучше обеспечивать протекание процессов подачи, смесеобразования, сго-

рания, удаления продуктов сгорания из двигателя, не вызывая при этом износа или перегрева деталей, коррозии, загрязнения двигателя. Желательно, чтобы в ограниченном объеме топливных баков помещалось возможно большее количество топлива. При транспортировке, хранении и заправке важное значение имеет стабильность топлива, удобство и безопасность обращения с ним [1, 34, 73, 81].

Требования к свойствам топлива

Общие требования, предъявляемые к энергетическим и физико-химическим свойствам топлива, можно сгруппировать следующим образом:

а) *требования к энергетическим свойствам:*

- высокая теплотворность;
- благоприятные термодинамические свойства продуктов сгорания (стойкость против термической диссоциации, высокая теплемкость, отсутствие конденсированных веществ);
- низкий стехиометрический коэффициент (возможно меньшее потребное количество окислителя);
- высокая плотность, облегчающая создание на борту требуемого запаса энергии и рабочего тела для двигателя;

б) *требования к физико-химическим свойствам, обеспечивающим рабочий процесс двигателя:*

- невысокая вязкость (особенно при низкой температуре), гарантирующая хороший распыл топлива при поступлении в камеру сгорания;
- оптимальная испаряемость (температура кипения или фракционный состав и давление насыщенных паров), достаточная для хорошего смесеобразования перед сгоранием, в том числе при запуске, но не вызывающая кавитации в топливной системе;
- достаточно интенсивное и одновременно равномерное и устойчивое горение без детонации и опасного уровня вибраций;
- высокая полнота сгорания;

в) *требования к физико-химическим свойствам, влияющим на безотказность работы и срок службы двигателя и топливной системы:*

- низкая температура начала кристаллизации;
- физическая однородность (отсутствие твердых включений — механических примесей, отсутствие эмульсионной воды);
- достаточные смазывающие свойства (поверхностная активность), предотвращающие разрушение или быстрый износ узлов трения топливной аппаратуры;
- отсутствие или неопасный уровень коррозионного действия на металлы и разрушающего воздействия на другие материалы (резину, пластмассы) как самого топлива, так и продуктов его сгорания;

- отсутствие химически нестойких составных частей, склонных к превращению в твердые или высоковязкие (смолистые) отложения в топливной системе;
 - низкая излучательная способность пламени (во избежание опасного нагрева стенок камеры сгорания);
 - отсутствие нагарообразования;
- г) требования к физико-химическим свойствам, связанные с обеспечением боеготовности, удобства обращения и безопасности личного состава:
- низкая температура застывания, обеспечивающая возможность перекачки и заправки в условиях сильных морозов;
 - высокая температура кипения или высокая температура вспышки, способствующая уменьшению потерь при хранении и снижению пожарной опасности;
 - химическая стабильность при длительном хранении;
 - низкая гигроскопичность (неспособность поглощать влагу из воздуха);
 - взрывобезопасность;
 - невысокий уровень токсичности (ядовитости) жидкого топлива, его паров и продуктов сгорания [1, 60, 73].

Соответствие топлива двигателю

Кроме общих требований к топливу могут предъявляться специфические требования, отвечающие условиям их применения в двигателях определенных типов, например самовоспламеняемость при контакте горючего с окислителем в ЖРД; высокая теплоемкость при использовании топлива в качестве охлаждающей жидкости в рубашке камеры сгорания ЖРД. Да и каждое из общих требований по своей значимости неодинаково в двигателях различных типов.

Реальные топлива, как правило, не обладают всем комплексом желательных свойств. К каждому топливу предъявляются высокие требования только по тем свойствам, которые являются решающими для его использования в двигателях определенного типа. К остальным, менее существенным свойствам обычно предъявляются лишь минимальные требования либо вообще их не предъявляют. При этом имеется в виду, что топливо должно быть возможно более дешевым и недефицитным [81, 107].

Г л а в а 2

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОИЗВОДСТВЕ ТОПЛИВ

НЕФТЬ — ОСНОВНОЙ ВИД СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВ

Запасы и добыча

Практически все авиационное топливо и некоторые горючие компоненты ракетного топлива вырабатываются из нефти¹. Развеянные запасы нефти в различных районах земного шара из года в год увеличиваются. По-видимому, нефтяные запасы Земли составляют сотни миллиардов тонн, причем значительная их часть находится на территории Советского Союза. Хотя мировая добыча нефти превышает 2 млрд. тонн в год, угрозы истощения запасов нефти не возникнет в течение, по крайней мере, ряда десятилетий.

В СССР нефтедобыча и нефтепереработка растут высокими темпами. За последние 20 лет добыча нефти возросла более чем в 10 раз и достигла в 1970 году 353 млн тонн, а в текущем пятилетии выйдет на полумиллиардный рубеж. Основную долю нефти дают волго-уральские месторождения (около $\frac{3}{4}$ всей добычи), районы Баку и Грозного, западного Казахстана и Туркменистана; развивается нефтедобыча в районах крупнейших в стране западно-сибирских месторождений нефти.

Переработка нефти

Нефть состоит из углеводородов разнообразного строения с различной температурой кипения, некоторого количества гетероорганических соединений, содержащих кислород, серу, азот, а также неорганических примесей серы, солей и др. Существуют два пути переработки нефти на топливо для двигателей. Первый — выделение содержащихся в нефти углеводородных фракций с подходящими физико-химическими свойствами и удаление из них вредных примесей. Второй путь — химическая переработка углеводородов, изменение их состава и строения в целях придания топливу требуемых физико-химических свойств, т. е. получение таких углеводородных фракций, которые в нефти не содержались или находились в малых количествах.

¹ Выработка авиационного топлива из угля и других твердых горючих обходится значительно дороже, чем из нефти, и практически прекращена (за исключением нескольких заводов за границей).

В настоящее время выработка основной массы авиационного топлива осуществляется первым путем, а второй путь используется главным образом для выработки отдельных компонентов топлива. Необходимые свойства придают топливу при его производстве в результате соответствующего выбора сырья (нефти того или иного месторождения) и технологий, смешения компонентов, добавки присадок. Качество сырья и способ производства иногда являются причиной некоторых нежелательных свойств топлива, с которыми приходится считаться при его применении, например коррозионной активности топлив из сернистых волгоуральских нефтей, недостаточной термостабильности топлив из бакинских нефтей, низких противоизносных свойств топлив после гидроочистки.

Второй путь, устраняющий зависимость качества топлива от природы нефти, приобретает все большее значение по мере ужесточения требований к топливу, связанного с повышением температурного режима и другими неблагоприятными условиями работы авиационной техники [60, 62].

ПРЯМАЯ ПЕРЕГОНКА НЕФТИ

Работа трубчатой установки

Первичным процессом переработки нефти является *прямая перегонка*. Она представляет собой физическое разделение

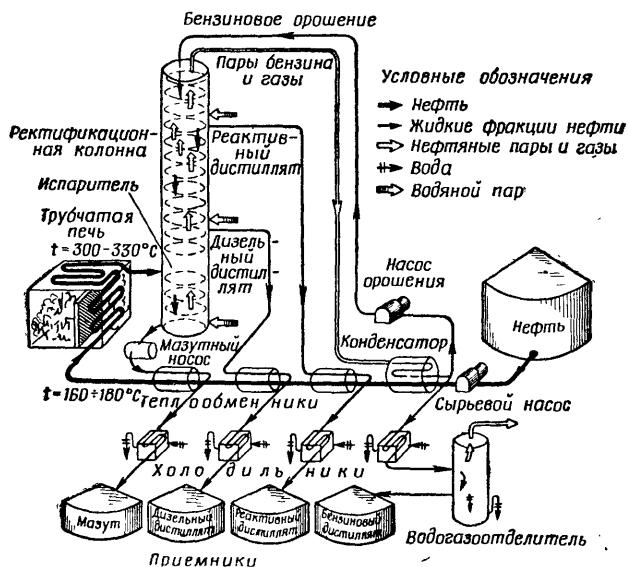


Рис. 14. Схема трубчатой нефтеперегонной установки

нефти на фракции с различными пределами температуры выкипания. Перегонка ведется на трубчатых установках (рис. 14). Нефть, нагретая в теплообменниках и в трубчатой печи до темпе-

ратуры 300—330° С, поступает в ректификационную колонну — стальную башню высотой 15—30 м с поперечными перегородками — тарелками, где ее легкая часть испаряется; неиспарившийся остаток (мазут) стекает в нижнюю часть колонны.

Нефтяные пары, поднимаясь вверх по колонне, охлаждаются и постепенно конденсируются на тарелках, образуя дистилляты различного состава. С тарелок средней части колонны отбирается дистиллят дизельного топлива со сравнительно высокой температурой кипения, с верхних, более холодных тарелок, — дистиллят реактивного топлива с более низкой температурой кипения. Самые низкокипящие фракции нефти выходят из колонны вверх по трубам и поступают в холодильные устройства; из них конденсируется бензиновый дистиллят и отделяются углеводородные газы. Для поддержания требуемого перепада температуры верхняя часть колонны охлаждается путем орошения — возвращения части бензина в жидком виде, а отдельные тарелки нижней и средней части подогреваются перегретым водяным паром [60].

Выход целевых продуктов

При прямой перегонке нефти получается в среднем 10—15% бензина, 15—20% реактивного топлива или керосина, 15—20% дизельного топлива и около 50% мазута. Годовая производительность современной трубчатой установки достигает нескольких миллионов тонн нефти в год [60, 62, 68].

ОЧИСТКА И ПЕРЕРАБОТКА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Химическая очистка

Очистка дистиллятов от вредных примесей, имеющих большей частью кислые свойства, производится щелочью — раствором каустической соды. Если дистиллят содержит значительное количество смол, сернистых и азотистых веществ, его подвергают обработке 92—93% серной кислотой, с которой они реагируют и выпадают в отстой. После очистки топливо промывается водой.

Наиболее надежным способом удаления сернистых соединений (их много в урало-волжских нефтях) является каталитическая гидроочистка нефтепродуктов (очистка водородом). При давлении 50—70 атмосфер и температуре порядка 400° С водород, смешанный с парами дистиллята, соединяется с содержащейся в них серой, образуя сероводород. В дальнейшем сероводород удаляется из дистиллята путем щелочной очистки. При гидроочистке происходит также присоединение водорода к непредельным углеводородам и превращение их в предельные, благодаря чему повышается стабильность топлива. Уменьшение содержания наиболее вредных соединений серы — меркаптанов может также производиться путем каталитического превращения их в неактивные дисульфиды (без

уменьшения общего содержания серы) по реакции $2\text{RSH} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{RSSR} + \text{H}_2\text{O}$; этот вид очистки называется *демеркаптанизацией* [60, 61].

Депарафинизация

Для понижения температуры застывания авиационных топлив их иногда подвергают особому виду очистки — обработке *карбамидом* (мочевиной) $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$. К нему присоединяются высокоплавкие парафиновые углеводороды. В топливе образуется взвесь, которая затем отфильтровывается.

Очищенные продукты прямой перегонки нефти, если они удовлетворяют соответствующим техническим требованиям, являются готовыми топливами для двигателей. При необходимости их улучшают путем добавления таких компонентов и присадок, которые обеспечивают получение топлив с требуемыми показателями. Непригодные в качестве топлив фракции идут на химическую переработку [60].

Термический крекинг

Наиболее простой, но невыгодный из-за низкого качества получаемых продуктов вид химической переработки тяжелых нефтяных фракций (в первую очередь мазута) — термический крекинг. Сущность крекинга — расщепление крупных молекул на мелкие под действием высокой температуры (около 500°C). Он ведется при давлении в несколько десятков атмосфер. Выход легких нефтепродуктов типа бензина и керосина при термическом крекинге может быть порядка 50%, но они содержат много непредельных углеводородов и поэтому нестабильны. Лучшее качество топлива получается при более сложных и дорогих каталитических процессах [60, 89].

Катализическая переработка

Катализический крекинг обычно проводится в колоннах, заполненных твердым измельченным катализатором, при температуре около 500°C и давлении в несколько атмосфер. Параллельно с расщеплением крупных углеводородных молекул идут процессы полимеризации — соединения мелких молекул в новые структуры, перераспределения водорода с образованием ароматических углеводородов и изопарафинов и др. Катализический *риформинг* на алюмоплатиновом катализаторе превращает нафтеновые углеводороды в ароматические ($\text{C}_n\text{H}_{2n} \rightarrow \text{C}_n\text{H}_{2n-6} + 3\text{H}_2$). Он проводится главным образом в целях повышения детонационной стойкости бензинов, но одновременно обеспечивает получение дешевого водорода.

Катализический *гидрокрекинг*, проводимый в среде водорода под давлением 50—150 атмосфер, наоборот, обеспечивает превра-

щение полициклических ароматических углеводородов в стабильные, выгодные в составе реактивных топлив нафтины. Непредельные углеводороды, присоединяя водород, в этом процессе превращаются в парафиновые и изопарафиновые, а соединения серы удаляются, как при гидроочистке.

Отдельные компоненты, необходимые для улучшения детонационной стойкости и испаряемости авиабензинов, повышения плотности и теплотворности реактивных топлив, а также некоторые горючие компоненты ракетных топлив вырабатываются с помощью каталитических процессов гидрогенизации, алкилирования, изомеризации легких углеводородов, главным образом химически активных непредельных крекинг-газов. В результате получаются молекулы с определенной структурой, обеспечивающей продукту требуемые свойства. Полимеризацией непредельных газов можно получить нужную структуру молекул как жидким топливам, так и каучукообразных полимеров, используемых в качестве горючего и связывающего вещества в составе твердых ракетных топлив [28, 61, 82, 123].

ПРИНЦИПЫ ПРОИЗВОДСТВА НЕУГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ И КОМПОНЕНТОВ

Получение водорода

Водород получают различными способами из метана (или других природных углеводородных газов) путем термического разложения $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$, частичного окисления $\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$, взаимодействия с водяным паром (конверсией) $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$, пропусканием водяного пара через раскаленный уголь $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}$ и взаимодействием его с окисью углерода $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$. Большая часть этих процессов обратима и дает существенный выход только при температуре порядка 1000°C в присутствии катализаторов, вследствие чего процессы оказываются дорогими. Более дешевый водород получается из крекинг-газов, в особенности образующихся при каталитическом риформинге и гидрокрекинге нефтяных дистиллятов, а также из коксового газа. При наличии дешевой электроэнергии водород может быть получен электролизом воды. Охаждение водорода производится путем предварительного сжатия, глубокого охлаждения жидким азотом, расширения с отводом механической энергии и теплоты конденсации. Непосредственно перед охаждением при температурах минус 210 — 253°C с помощью катализатора (гидроокиси железа) осуществляется процесс ортопарепрехода (см. стр. 22), так как при температуре кипения жидкого водорода термодинамически равновесным является параводород, причем переход от нормального состава к параводороду сопровождается выделением большего количества тепла (126 ккал/кг), чем требуется для испарения водорода (108 ккал/кг). Если ортопара-

переход не провести искусственно, то при его медленном естественном протекании жидкий водород полностью испарится даже в условиях идеальной тепловой изоляции [68, 86].

Получение кислорода

Кислород получают из жидкого воздуха. Путем чередующегося сжатия, охлаждения и расширения температура воздуха последовательно снижается вплоть до перехода его в жидкое состояние. Затем при температуре около -190°C из воздуха испаряется практически весь азот ($t_{\text{кип}} = -196^{\circ}\text{C}$) и остается жидкий кислород ($t_{\text{кип}} = -183^{\circ}\text{C}$). Выделенный азот используется в производстве его соединений и для различных технических целей, в том числе вновь охлаждается до охлаждения и заливается в зарубашечную полость емкостей с жидким кислородом и другими криогенными компонентами, имеющими температуру кипения выше, чем у азота [10, 73].

Получение азотсодержащих компонентов

Аммиак получают прямым синтезом из азота и водорода $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$ в контактном аппарате — башне, заполненной катализатором (окислами железа) при температуре выше 500°C и давлении 500—1000 атмосфер. Образовавшийся аммиак отделяется от непрореагировавшей газовой смеси при пропускании через холодильник (температура кипения жидкого аммиака -33°C). Синтез аммиака является основой производства всех соединений азота. Азотный тетроксид и азотная кислота получаются окислением аммиака воздухом в контактном аппарате с платиновым катализатором. Аммиак вначале превращается в окись азота NO , затем — в двуокись NO_2 и, наконец, при охлаждении ниже 21°C — в жидкую четырехокись N_2O_4 — азотный тетроксид. Азотную кислоту получают из двуокиси азота, растворяя ее в воде без кислорода или в присутствии кислорода: $3\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HNO}_3 + \text{NO}$ или $4\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{HNO}_3$.

Нитроглицерин, нитроцеллюлоза, нитрат аммония и другие нитраты, являющиеся составными частями твердых ракетных топлив, получают в результате взаимодействия концентрированной азотной кислоты с глицерином, целлюлозой, раствором аммиака и т. д. Амины — горючие компоненты жидких ракетных топлив — получают различными путями: триэтиламин $\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$ при взаимодействии аммиака с этиловым спиртом, ксилидин $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2(\text{CH}_3)_2$ — путем обработки ксиола азотной кислотой, а затем водородом.

Гидразин N_2H_4 получают из аммиака обработкой гипохлоритом: $2\text{NH}_3 + \text{NaOCl} \rightarrow \text{N}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$; для производства диметилгидразина $\text{N}_2\text{H}_2(\text{CH}_3)_2$, кроме того, используется диметиламин $\text{NH}(\text{CH}_3)_2 + \text{NH}_3 + \text{NaOCl} \rightarrow \text{N}_2\text{H}_2(\text{CH}_3)_2 + \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ [2, 73, 86].

Глава 3

ТОПЛИВА ДЛЯ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (РЕАКТИВНЫЕ ТОПЛИВА)

УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ТОПЛИВ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Типы топлив

Самолеты и вертолеты с газотурбинными двигателями (турбореактивными и турбовинтовыми) — основной, наиболее массовый вид авиационной техники; они должны быть рассчитаны на применение топлив, хорошо обеспеченных сырьевыми ресурсами и производственной базой. Чтобы получить от бортового запаса топлива, ограниченного емкостью баков и начальным полетным весом самолета, возможно больше энергии, к топливам предъявляются требования высокой *теплотворности* и *плотности*. Из массовых и дешевых видов нефтяных топлив этим требованиям лучше всего удовлетворяют керосины, выкипающие в пределах примерно 120—280° С (рис. 12). Кроме них в ограниченных масштабах применяются широкофракционные топлива — смеси керосина и бензина (главным образом на дозвуковых самолетах), выкипающие в пределах примерно 60—280° С, и утяжеленные керосины с пределами выкипания 195—315° С для самолетов с большими сверхзвуковыми скоростями [60, 80].

Подача топлива

Ряд требований к качеству топлив связан с устройством и условиями работы топливной системы самолета и топливной аппаратуры двигателя. Чтобы избежать кавитации в топливной системе самолета, паро-воздушных пробок, перебоев в работе подкачивающих и перекачивающих насосов, для широкофракционного топлива устанавливается предельная норма по давлению насыщенных паров (не более 100 мм рт. ст. при 38° С). Перед поступлением в двигатель топливо, как правило, проходит через *теплообменник* (топливо-масляный радиатор), где его температура повышается на 20—40° С, а в некоторых условиях (например, при снижении самолета) — на 80—100° С. В связи с нагревом во избежание появления твердых осадков топливо должно быть *термостабильным* (желательно, чтобы осадок не превышал 10—

12 мг на 100 мл). В дальнейшем требования по этому показателю будут повышаться (в частности, для гидроочищенных топлив установлена норма не более 6 мг на 100 мл).

Фильтр низкого давления служит для защиты насосов и регуляторов подачи топлива от твердых частиц, случайно появившихся в топливной системе извне или вследствие износа. Применение топлива, загрязненного *механическими примесями*, содержащего *кристаллы льда* или *воду*, приводит к забиванию фильтра, снижению его пропускной способности и отказу в работе двигателя. Температура *начала кристаллизации* топлива должна быть не выше -60°C .

Топливная аппаратура двигателя выполнена по высокому классу точности, с зазорами порядка 7—10 мк, с каналами сечением в десятичные доли миллиметра; даже небольшие отложения и коррозия могут нарушить ее нормальную работу. В связи с этим в топливе ограничено содержание *фактических смол* (до 4—6 мг в 100 мл топлива) и склонных к смелообразованию *непредельных углеводородов* (йодное число не более 2—3,5 г, а для гидроочищенных топлив не более 0,5—1 г на 100 г топлива, что соответствует 0,3—2,5% непредельных углеводородов). Недопустима *свободная (элементарная) сера*, а содержание *меркаптановой серы* ограничено величиной 0,005%; в дальнейшем этот показатель должен ужесточаться. В топливах из малосернистых нефтей меркаптановой серы практически нет; в сортах, подвергаемых гидроочистке, содержание ее доводится до 0,001% и ниже. Совершенно не допускаются коррозионноактивные *водорастворимые кислоты и щелочи*. *Органическая кислотность* топлива ограничена не столь жестко — она не должна превышать 0,7—1 мг КОН на 100 мл, а для гидроочищенных топлив 0,5 мг.

Работа агрегатов топливной аппаратуры зависит также от *вязкости* топлива. Повышенная вязкость приводит к большим нагрузкам насоса, может замедлить работу некоторых регулирующих устройств, ухудшает распыл топлива форсункой. С укрупнением капель резко замедляются прогрев и испарение топлива, вприснутого в камеру сгорания, снижается полнота сгорания, ухудшается запуск, усиливается нагарообразование. Вязкость топлив ограничивается по верхнему пределу при *отрицательных температурах*, когда она высокая (рис. 15). При положительной температуре $+20^{\circ}\text{C}$ вязкость ограничена по нижнему пределу из соображений главным образом улучшения смазки насоса. Однако смазывающие свойства топлива в насосе, по-видимому, мало зависят от вязкости, определяющим их фактором является наличие в топливе поверхностно-активных веществ, которое не нормируется [35, 60, 80, 112].

Сжигание топлива

Условия для сгорания топлива при режимной работе газотурбинных двигателей достаточно благоприятны, чтобы не предъявлять особых требований к испаряемости топ-

лива. Большая часть топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания, попадает в поток сжатого воздуха с температурой 200—400°С или же еще более горячих продуктов сгорания, подсасываемых в сторону форсунки (рис. 16), и быстро испаряется. На границе обратного потока и струй воздуха, поступающего от фронтового устройства, и особенно через боковые отверстия, горячие газы энергично перемешиваются с воздухом и парами топлива и поджигают топливо-воздушную смесь. Образуется стаканообразный или извилистый фронт пламени, в котором при нормальной работе успевает сгореть практически все топливо. Менее благоприятны условия для испарения при запуске двигателя, так как в ка-

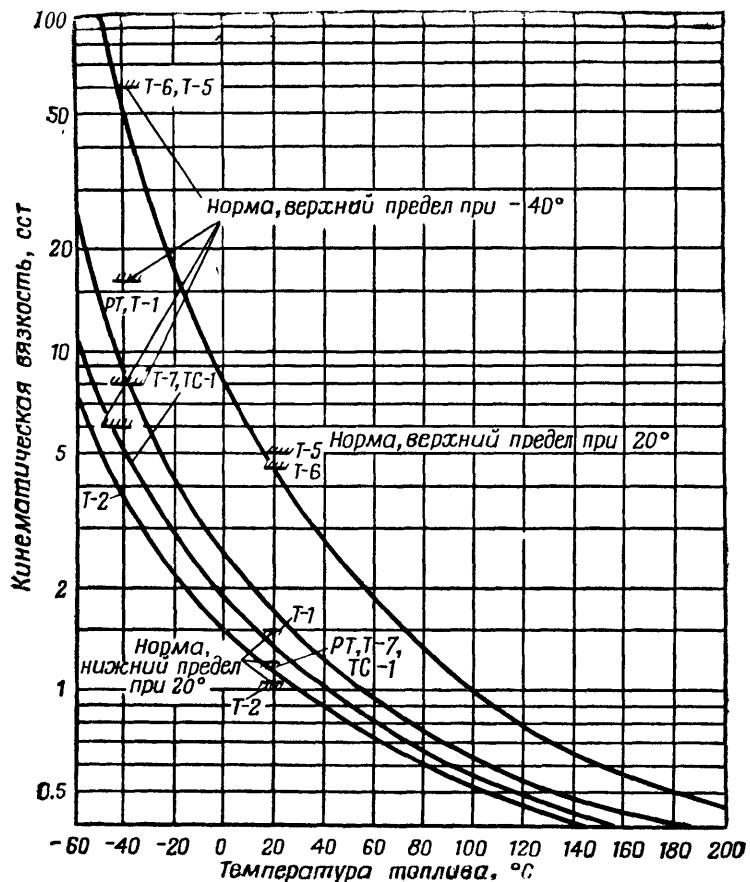


Рис. 15. Зависимость вязкости реактивных топлив от температуры

меру сгорания поступает холодный воздух. В связи с этим в некоторых двигателях пусковым топливом служит легко испаряющийся бензин.

Определенные требования к физико-химическим свойствам топлива предъявляются в целях предотвращения нагараобразования на деталях газового тракта двигателей, для чего ограничивают содержание ароматических углеводородов (не более 10—22%) и высоту некоптящего пламени (не менее 20—25 мм). Во избежание появления неорганического нагара (шлака) ограничивается зольность топлив (не более 0,003%). Ввиду трудностей анализа нормы по конкретным зольным примесям, вызывающим коррозию газового тракта (окислы ванадия и др.), не установлены. Во избежание газовой коррозии ограничено общее содержание серы — в топливах из малосернистых нефтей не более 0,1%, а в топливах из сернистых не более 0,25%. Для топливной же системы так называемое «общее содержание серы» не

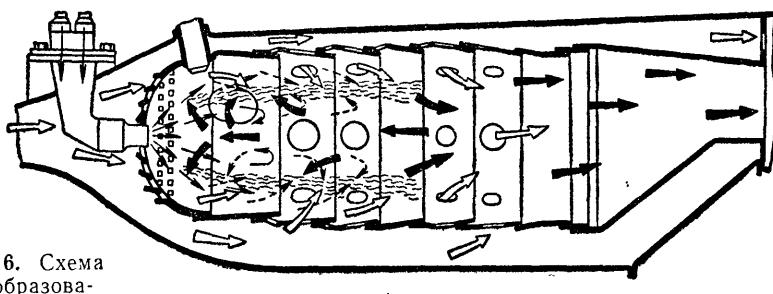


Рис. 16. Схема смесеобразования и сжигания топлива в камере сгорания газотурбинного двигателя

Условные обозначения

→ Воздух	→ Продукты сгорания
→ Жидкое топливо	— Зона пламени
--- Пары топлива	

вредно, так как практически вся эта сера входит в состав неактивных соединений. Предполагается, что они играют полезную роль — являются антиокислителями и смазывающими веществами. Для гидроочищенных топлив верхний предел общего содержания серы 0,05%.

Наконец, для большей пожарной безопасности установлено ограничение испаряемости легких фракций топлива типа керосина по температуре вспышки от пламени не ниже 28—30° С [35, 60, 80].

Влияние топлива на надежность техники

К топливам для газотурбинных двигателей предъявляются в первую очередь такие требования, которые обеспечивают надежность работы двигателей и, следовательно, безаварийность полетов.

На рисунке 17 дана принципиальная схема связи свойств топлива с видами отказов, дефектов и других ненормальных явлений в эксплуатации, а также с тактико-техническими данными самолета и двигателя. Степень влияния различных свойств топлива не одинакова, а в ряде случаев четко еще не опреде-

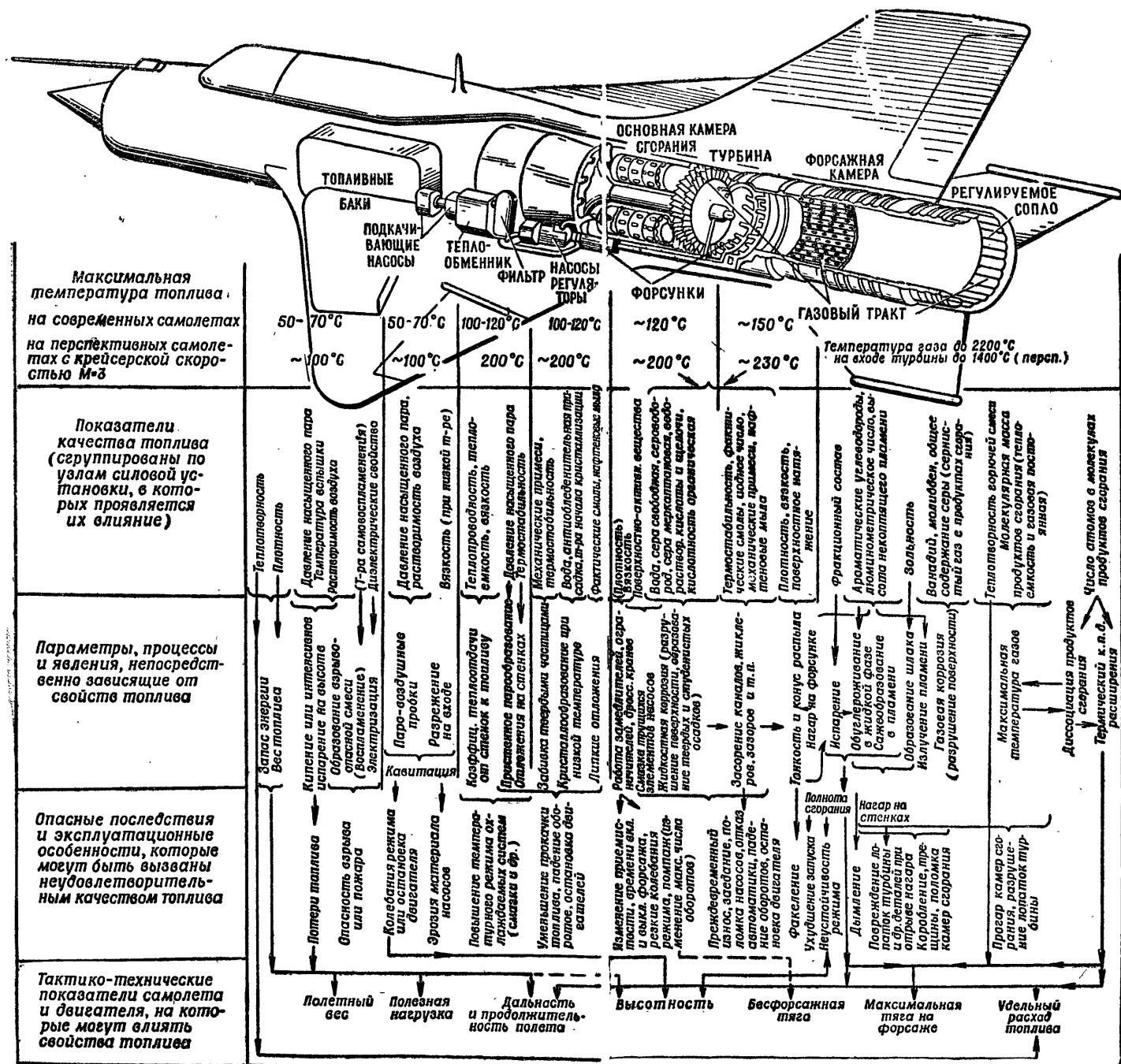


Рис. 17. Свойства реактивного топлива, влияющие на тактико-технические данные самолета и на эксплуатационную надежность его силовой установки

лена. Некоторые показатели обоснованы применительно к одним типам ТРД или ТВД и недостаточно — к другим. Сами свойства взаимно связаны, так как в конечном счете определяются только химическим составом топлива и, следовательно, обусловлены сортом нефти, технологией ее переработки, присадками. Улучшение одних свойств иногда сопровождается ухудшением других, и высокий уровень требований по всем показателям практически не может быть реализован. Ввиду всего этого стандартами установлено, что топливо для реактивных двигателей должно соответствовать по сырью и технологии производства тем образцам, которые прошли официальные испытания на двигателях. Соответствие товарной продукции нефтяной промышленности испытанным образцам служит дополнительной гарантией надежности работы техники [7, 80, 112].

СОРТА РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ

Авиакеросины

Топливо Т-1, которое получают в основном из малосернистых нефтей Баку и Сахалина, содержит значительное количество нафтеновых углеводородов и отличается более высокой плотностью по сравнению с другими массовыми сортами авиационного керосина (по техническим нормам плотность при 20° С не ниже 0,800, фактически 0,800—0,830).

Наиболее широко применяется топливо ТС-1 (буквы в его марке означают «топливо сернистое»). Топливо ТС-1 вырабатывают из урало-волжских сернистых нефтей, ресурсы и добыча которых в несколько раз больше по сравнению с малосернистыми нефтями Баку. Топливо ТС-1 имеет меньшую плотность (не ниже 0,775 при 20° С), оно несколько хуже, чем топливо Т-1, по коррозионным свойствам и влиянию на износ топливных насосов двигателей; однако топливо сорта ТС-1 обеспечивает нормальную работу в течение полного ресурса серийных двигателей, для которых он предназначен. Освоение сибирских малосернистых нефтей позволит вырабатывать топливо ТС-1 такой же плотности, как урало-волжское, но не уступающее Т-1 по коррозионной пассивности. Невысокая плотность топлива ТС-1 объясняется тем, что урало-волжские и сибирские нефти состоят преимущественно из относительно легких парафиновых углеводородов, среди которых значительную часть составляют нормальные или малоразветвленные парафины с высокой температурой кристаллизации. Чтобы обеспечить начало кристаллизации топлива ниже —60° С, фракционный состав ТС-1 делают более легким; ТС-1 — это облегченный керосин (см. рис. 12).

Топлива ТС-1 и Т-1 (особенно Т-1) обладают недостаточной термической стабильностью. Ввиду этого внедряется новое термостабильное топливо сорта Т-7. Оно вырабатывается из той же нефтяной фракции, что и ТС-1, путем гидроочистки (очистки водородом) от нестабильных и коррозионноактивных примесей. При этом противозносные свойства топлива, к сожалению, ухудшаются, а также увеличивается склонность к газовой коррозии камер сгорания (вероятно, под влиянием мик-

ропримесей, источником которых является металлический катализатор в процессе гидроочистки).

Унифицированный сорт топлива РТ предназначен для реактивных двигателей дозвуковой авиации и сверхзвуковой с ограниченной продолжительностью полета. Он может получаться из различных нефтей и по разной технологии — прямой перегонкой с применением процесса гидроочистки и смешением прямогонных и гидроочищенных компонентов. По нормам фракционного состава топливо РТ соответствует авиакеросинам как сорта Т-1, так и сортов ТС-1 и Т-7. По нормам содержания меркаптановой и общей серы, фактических смол и непредельных углеводородов, по термостабильности, кислотности и теплотворности он соответствует лучшему из указанных сортов — топливу Т-7. В нем несколько меньше содержание ароматических углеводородов по сравнению с прежними сортами авиакеросинов, предусмотрен контроль излучения пламени. Плотность топлива РТ установлена не ниже 0,775 при 20° С (как для сортов ТС-1 и Т-7), но по требованию потребителей может поставляться топливо РТ с плотностью не ниже 0,800 с одновременным снижением теплотворности до 10 250 ккал/кг (как у сорта Т-1) и ухудшением показателя излучения пламени [35, 60, 66, 72].

Широкофракционное топливо

В отличие от топлив Т-1, ТС-1 и Т-7, представляющих собой авиакеросины, топливо Т-2 имеет широкий фракционный состав — оно является смесью керосина и бензина. Увеличение его производства в случае необходимости может обеспечить значительное повышение выхода реактивного топлива из нефти. Топливо сорта Т-2 может вырабатываться как из малосернистых, так и из сернистых нефтей. По сравнению с керосинами топливо Т-2 имеет меньшую плотность (не ниже 0,755 при 20° С) и вязкость, худшие противоизносные свойства и более высокое давление насыщенного пара, способствующее возникновению кавитации в топливной системе самолета; по коррозионным свойствам оно обычно не отличается от топлива ТС-1. Вследствие недостатков топлива Т-2 его применяют не на всех типах двигателей, а для ряда двигателей при его использовании установлены сокращенные сроки службы топливных насосов. Для самолетов, не имеющих наддува основных топливных баков, при работе на топливе Т-2 в случае высокой температуры топлива в жаркую погоду ограничена высота полета [35, 60, 65].

Топлива с присадками

Для существенного улучшения термической стабильности и противоизносных свойств реактивных топлив разработаны специальные присадки ТП, П и другие, которые вводятся в топлива при их производстве; соответствующие марки топлив с присадкой обоз-

значают ТС-1ТП, Т-2ТП, Т-7ТП и ТС-1П, Т-2П, Т-7П. Широкофракционные топлива Т-2ТП и Т-2П по противоизносным свойствам не уступают авиакеросинам и не требуют сокращения срока службы топливных насосов и двигателей (ресурс отсчитывается час за час).

Смешение реактивных топлив различных сортов в резервуарах и заправочных средствах не разрешается, так как это затруднило бы проверку качества топлива: нельзя установить, нормам какого сорта топлива должна отвечать смесь. При дозаправке самолетов можно смешивать в топливных баках любые сорта, допущенные к применению на данном типе самолета [60, 109].

Утяжеленные керосины

Для сверхзвуковых самолетов предусмотрено гидрированное топливо Т-6 утяжеленного фракционного состава (см. рис. 12). Плотность его при 20° С не менее 0,840. Высокая температура начала кипения (не ниже 195° С) и удаление из этого топлива нестабильных и коррозионноактивных веществ должны обеспечить нормальную работу топливной системы самолета и двигателей при длительном сверхзвуковом полете в высотных условиях, при котором топливо нагревается до 100—150° С и выше. Близкое по фракционному составу топливо Т-5 с плотностью при 20° С не менее 0,845, не подвергаемое гидроочистке, резко отличается от топливу Т-6 по термостабильности; это топливо пригодно только для кратковременных полетов. Высокая вязкость топлив Т-6 и Т-5 при отрицательных температурах не позволяет использовать их на тех двигателях, топливная аппаратура которых рассчитана на применение обычных керосинов и широкофракционного топлива (см. рис. 15) [58, 66].

Зарубежные сорта

Из применяемых за рубежом сортов реактивного топлива важнейшими являются:

— широфракционное топливо JP-4 или сорт В (марка США), или AVTAG (английская марка), или Air 3407 (французская марка) с плотностью 0,746—0,797 при 20° С, давлением насыщенного пара 103—160 мм рт. ст. при 38° С, температурой замерзания около —60° С (оно содержит больше бензиновых фракций, чем советское топливо Т-2, и может быть использовано только при фактическом соответствии нормам Т-2 на тех самолетах, где последнее допущено, в том числе по давлению насыщенного пара не выше 100 мм рт. ст.);

— авиакеросин Jet A и AI (марки США) или AVTUR/40, ATF-650 и AVTUR/50, ATF-750, ATK (английские марки) или Air 3405 (французская марка) с плотностью 0,770—0,825, температурой вспышки 43° С, температурой замерзания соответственно —40 и —50° С (пригоден взамен Т-1, ТС-1, Т-7, за исключением районов с более низкой температурой и длительных высотных полетов на дозвуковых скоростях);

— утяжеленный авиакеросин JP-5 (марки США) или AVCAT/40, AVCAT/50 (английские марки) или Air 3404 (французская марка) с плотностью 0,783—0,841, температурой вспышки не ниже 60°С, температурой замерзания соответственно —40 и —50°С (при фактическом соответствии нормам на топливо Т-6 может быть его заменителем).

До последнего времени топливо JP-4 было главным сортом в военной авиации США; с 1969—1970 гг. применение его сокращается (главным образом из-за пожарной опасности) и осуществляется переход на топлива типа керосина. Топливо JP-5 (наименее пожароопасное) предназначено в основном для морской авиации, базирующейся на авианосцах.

В последние годы в США появились термостабильные авиакеросины JP-6, JP-7, JP-8 для сверхзвуковых самолетов, имеющие более высокую температуру начала кипения и более низкую — конца кипения по сравнению с другими сортами, отличающиеся лучшей очисткой и наличием присадок [107, 110, 120].

О ВЛИЯНИИ СВОЙСТВ ТОПЛИВА НА СИЛУ ТЯГИ ДВИГАТЕЛЯ

Бесфорсажные режимы

Свойства топлива, а также его неполное сгорание, как правило, практически не влияют на величину силы тяги (мощности) газотурбинного двигателя, а следовательно, и на скорость полета. При большей теплотворности или большей плотности, или же лучшей полноте сгорания насос-регулятор, обеспечивающий заданную программу регулирования, подает меньший объем топлива. Расход топлива на обычных режимах ($\alpha > 1$) автоматически устанавливается таким образом, чтобы в единицу времени выделялось одно и то же количество тепла, что обеспечивает получение одной и той же тяги (в соответственно равных прочих условиях). Положительный эффект более высокой теплотворности и плотности скажется на дальности полета и других факторах, зависящих от импульса силы тяги, но не на тяге.

Однако регуляторы некоторых двигателей имеют такие конструктивные особенности, которые делают их чувствительными к свойствам топлива. Так, на двигателях ВК-1 и РД-45Ф плотность топлива оказывает влияние на максимальное число оборотов из-за того, что их ограничитель срабатывает под давлением топлива, отбрасываемого центробежными силами при вращении ротора насоса (это давление пропорционально плотности). Ограничитель максимальных оборотов этих двигателей приходится регулировать при переходе с одного топлива на другое, если они имеют разную плотность.

На турбовинтовых двигателях АИ-20 и НК-12 различных модификаций командно-топливные агрегаты дозируют топливо по объему. Пропорционально плотности изменяется часовой расход топлива и в соответствии с характеристикой двигателя — его тяга. При существенном изменении плотности топлива необходимо произвести перенастройку гамма-корректора, имеющегося на командно-топливном агрегате этих двигателей [81].

Форсажные режимы

Тяга ТРД на режиме полного форсажа, который достигается при стехиометрическом соотношении топлива и воздуха

($\alpha=1$) без «разбавления» продуктов сгорания избыточным воздухом, почти не зависит от состава и свойств реально применяемых углеводородных топлив. Причина этого — практически однаковое количество тепла $\frac{H_u}{l_0} = 705 \text{ ккал} (\pm 1,5\%)$ на 1 кг воздуха, которое дают углеводородные топлива независимо от их конкретного химического состава (из чего следует приближенная формула теплотворности углеводородных топлив $H_u \approx 705 l_0$). Это объясняется тем, что топлива, содержащие больше водорода и выделяющие в связи с этим большее тепла, требуют для своего сгорания соответственно большее воздуха. То же относится и к прямоточным ВРД, работающим при $\alpha=1$.

При работе форсажного насоса некоторых типов ТРДФ на упоре максимальной производительности количество выделяемого тепла и, следовательно, тяга двигателя выше на топливах с более высокой плотностью или теплотворностью [81].

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ТОПЛИВА НА ДАЛЬНОСТЬ ПОЛЕТА САМОЛЕТА И НА ПОТРЕБНОЕ КОЛИЧЕСТВО ТОПЛИВА ДЛЯ ПОЛЕТА ПО ЗАДАННОЙ ПРОГРАММЕ

Энергоемкость топлива

Максимальное количество тепла, которое может быть получено в течение полета при сгорании топлива, равно произведению объема баков на плотность топлива и на его теплотворность $V_{\text{трт}} H_u$. В этом выражении произведение $H_u [\text{ккал}/\text{кг}] \cdot \rho_t [\text{кг}/\text{л}] = Q_u [\text{ккал}/\text{л}]$ представляет собой объемную теплотворность или энергоемкость топлива, т. е. количество тепла, выделяемое при сгорании 1 л топлива. Оно существенно для определения емкости баков при конструировании самолета.

Наибольшую энергоемкость имеют утяжеленные керосины (Т-6), затем следуют обычные и облегченные керосины (Т-1, ТС-1, Т-7), наименьшей энергоемкостью обладают широкофракционные

Таблица 7

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ (ОБЪЕМНАЯ ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ) ТОПЛИВ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И БЕНЗИНА ПО СРЕДНИМ ФАКТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Наименование топлива	Теплота сгорания, ккал/кг	Плотность при 20° С	Энергоемкость (ккал/л) при различной температуре топлива, °С				
			+40	+20 (стандартная)	0	-20	-40
Т-6	10 350	0,840	8540	8680	8830	8980	9110
Т-1	10 250	0,820	8260	8420	8570	8720	8860
ТС-1, Т-7	10 300	0,780	7850	8030	8200	8350	8500
Т-2	10 350	0,760	7690	7860	8000	8160	8330
Бензин Б-70	10 400	0,730	7400	7590	7760	7940	8100

топлива (Т-2) и бензины (табл. 7). Это объясняется тем, что с утяжелением фракционного состава обычных нефтяных топлив плотность, как правило, возрастает более резко, чем уменьшается теплотворность. Аналогичное влияние оказывает увеличение содержания ароматических углеводородов: они обладают на 10—15% большей плотностью, чем углеводороды других групп, и на 4—6% меньшей теплотворностью. Так как плотность топлив изменяется с температурой (примерно 1% на каждые 10° С), энергоемкость топлив зависит от их температуры [107].

Неравнозначность теплотворности и плотности

При эксплуатации самолетов не следует считать, что дальность полета пропорциональна энергоемкости топлива, и оказывать предпочтение топливам с высокой плотностью, не обращая внимания на их меньшую теплотворность. Воздействие теплотворности и плотности топлива на дальность полета неравнозначно. Теплотворность топлива всегда влияет на дальность полета самолета, а плотность — не всегда. В тех же случаях, когда дальность полета зависит от плотности топлива, она не пропорциональна плотности. Это обусловлено тем, что увеличение бортового запаса топлива за счет его плотности приводит к увеличению полетного веса самолета и, следовательно, к повышению расхода топлива (иначе говоря, часть увеличенного запаса топлива затрачивается на перевозку его самого). Если же полет производится с одинаковым начальным полетным весом, то увеличение веса топлива за счет его плотности сопряжено с соответствующим уменьшением полезного груза. Наконец, потребное для полета на заданную дальность (по заданной программе) количество топлива совершенно не зависит от его плотности; теплотворность же влияет и на него, и на величину полезного груза [73, 76].

Влияние на дальность полета

Ключом к анализу этого вопроса является уравнение импульсов, согласно которому дальность полета, как и другие характеристики, пропорциональна расположенному импульсу топлива $I_p = I_t \ln \Pi$. Из уравнений (1.11) и (1.12) следует, что для двух топлив, имеющих теплотворность H_1 и H_2 , отношение расположенных импульсов

$$\frac{I_{T_2}}{I_{T_1}} = \frac{H_2 \ln \Pi_2}{H_1 \ln \Pi_1}. \quad (3.1)$$

Практический интерес представляют три типичных случая.

Первый случай. Задан вес топлива ($G_t = \text{const}$). Топливные баки заправляются не полностью, так как взятый груз требует ограничения веса топлива. Поскольку $G_{T_1} = G_{T_2}$, $\Pi_1 = \Pi_2$ и, следовательно,

$$\frac{I_{T_2}}{I_{T_1}} = \frac{H_2}{H_1}, \quad (3.2)$$

т. е. дальность полета не зависит от плотности топлива, она пропорциональна его теплотворности (точнее количеству тепла, выделяемому при сгорании 1 кг топлива). Широкофракционное топливо (типа Т-2) с меньшей плотностью, но несколько большей весовой теплотворностью и

лучшей полнотой сгорания, чем Т-1, обеспечивает в этом случае несколько большую дальность полета (на 1–2%). Примерно на 1% большую дальность можно ожидать также при сжигании топлив Г-7 и Г-6.

Второй случай. Задан полезный груз ($G_{\text{п}} = \text{const}$). Топливные баки самолета заправлены полностью, полезный груз $G_{\text{п}_1} = G_{\text{п}_2}$ берется из такого расчета, чтобы начальный полетный вес самолета не превышал допустимую норму. При этом согласно уравнениям (3.1) и (1.14)

$$\frac{I_{T_2}}{I_{T_1}} = \frac{H_2 \ln \left(1 + \frac{V_T}{G_0 + G_{\text{п}}} \rho_{T_2} \right)}{H_1 \ln \left(1 + \frac{V_T}{G_0 + G_{\text{п}}} \rho_{T_1} \right)}, \quad (3.3)$$

дальность полета пропорциональна теплотворности топлива и связана логарифмической (более слабой) зависимостью с плотностью (рис. 18). Располагаемый импульс топлива и пропорциональная ему дальность полета изменяются за счет плотности меньше, чем исходный вес топлива на борту самолета, вследствие зависимости начального полетного веса самолета от плотности топлива: $G_{\text{п}} = G_0 + G_{\text{п}} + V_{\text{топ}}$. Так, повышение плотности на 5% от 0,800 до 0,840 дает увеличение импульса только на 2,7% при относительной емкости баков 1 л/кг и на 4% при относительной емкости баков 2 л/кг. При понижении плотности на 5% от 0,800 до 0,760 импульс уменьшается на 3–4%.

Третий случай. Задан начальный полетный вес ($G_{\text{п}} = \text{const}$). Топливные баки самолета заправлены полностью, равенство $G_{\text{п}_1} = G_{\text{п}_2}$ при изменении плотности и веса топлива достигается корректировкой полезного груза. Согласно уравнениям (3.1) и (1.13) в этом случае

$$\frac{I_{T_2}}{I_{T_1}} = \frac{\frac{H_2 \ln \frac{1}{1 - \frac{V_T}{G_{\text{п}}} \rho_{T_2}}}{H_1 \ln \frac{1}{1 - \frac{V_T}{G_{\text{п}}} \rho_{T_1}}}}{.} \quad (3.4)$$

Как и в предыдущих случаях, дальность полета пропорциональна теплотворности топлива, но логарифмическая зависимость ее от плотности более резкая (рис. 18). Изменение плотности на 5% вызывает при условии $G_{\text{п}} = \text{const}$ изменение импульса на 6,5–8%. Однако повышение бортового запаса топлива за счет плотности в этом случае происходит ценой уменьшения полезного груза: $-\Delta G_{\text{п}} = V_T \Delta \rho_T$. Поэтому роль плотности практически существенна только при выполнении полета на максимальную дальность с ограниченным полезным грузом [76, 81].

Потребный запас топлива

При выполнении полетов по заданному маршруту с заданным профилем выгодней топливо с большей теплотворностью, так как меньше его потребный вес. Плотность топлива при этом роли не играет, если только емкость баков достаточна для его размещения. Полетам по одинаковой программе соответствует одинаковый расход импульса и, следовательно, равенство $I_{T_2} = I_{T_1}$, выражаемое согласно уравнению (3.1) как $H_2 \ln \Pi_2 = H_1 \ln \Pi_1$ или

$$\frac{G_{\text{п}_2}}{G_{\text{п}_2} - G_{T_2}} = \left(\frac{G_{\text{п}_1}}{G_{\text{п}_1} - G_{T_1}} \right)^{\frac{H_1}{H_2}}. \quad (3.5)$$

В наиболее типичном случае, при перевозке на заданное расстояние *одного и того же полезного груза* ($G_{\text{п}_1} = G_{\text{п}_2}$), преобразование выражения (3.5) дает следующую зависимость потребного количества топлива G_{T_2} от его теплотвор-

ности H_2 (по отношению к эталонному топливу, вес которого G_{T_1} , а теплотворность H_1):

$$\frac{G_{T_2}}{G_{T_1}} = \frac{1 - \xi_{T_1}}{\xi_{T_1}} \left[\frac{1}{\frac{H_1}{H_2} - 1} \right] = \\ = \frac{1}{\xi_{T_1}} \left[1 - (1 - \xi_{T_1}) \frac{H_1}{H_2} \right] (1 - \xi_{T_1})^{1 - \frac{H_1}{H_2}}, \quad (3.6)$$

где $\xi_{T_1} = \frac{G_{T_1}}{G_{H_1}}$ — весовая доля первого (эталонного) топлива.

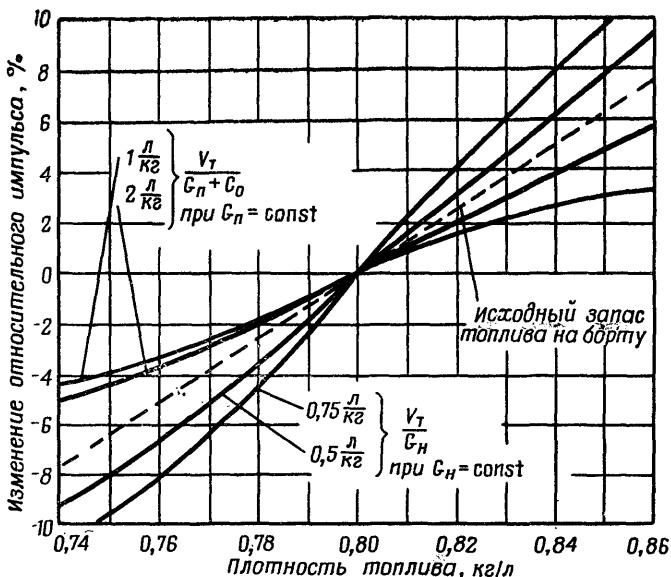


Рис. 18. Влияние плотности топлива на максимальную дальность полета самолета при одинаковом начальном полетном весе (линия $G_n = \text{const}$) или полезном грузе (линии $G_n = \text{const}$); за 100% принята дальность при плотности топлива $\rho = 0,8 \text{ кг/л}$

Потребное количество топлива при условии $G_n = \text{const}$ изменяется более резко, чем теплотворность (рис. 19): на 1,5—2% при изменении теплотворности на 1% в случае $\xi_T = 0,5 \div 0,75$. Это объясняется изменением начального полетного веса при изменении потребного количества топлива.

Если сохранить начальный полетный вес неизменным ($G_{H_0} = G_H$), корректируя полезный груз, то влияние теплотворности на потребный бортовой запас топлива, разумеется, будет менее резким. Соответствующее преобразование соотношения (3.5) в этом случае дает зависимость:

$$\frac{G_{T_2}}{G_{T_1}} = \frac{1}{\xi_{T_1}} \left[1 - (1 - \xi_{T_1}) \frac{H_1}{H_2} \right]. \quad (3.7)$$

Зная начальный полетный вес, можно определить получаемый при этом выигрыш или же проигрыш в величине полезного груза:

$$\Delta G_{\text{п}} = G_{T_1} \left(\frac{G_{T_2}}{G_{T_1}} - 1 \right) = G_{\text{п}} \xi_{T_1} \left(\frac{G_{T_2}}{G_{T_1}} - 1 \right). \quad (3.8)$$

При условии $G_{\text{п}} = \text{const}$ повышение теплотворности на 1% дает экономию топлива только на 0,5—0,7% при $\xi_{T_1} = 0,5 \div 0,75$ (рис. 19), но одновременно получается выигрыш в полезном грузе на 0,3—0,5% от начального полетного веса, что на тяжелом самолете достаточно существенно. Примерно такой же проигрыш получается при уменьшении теплотворности на 1%.

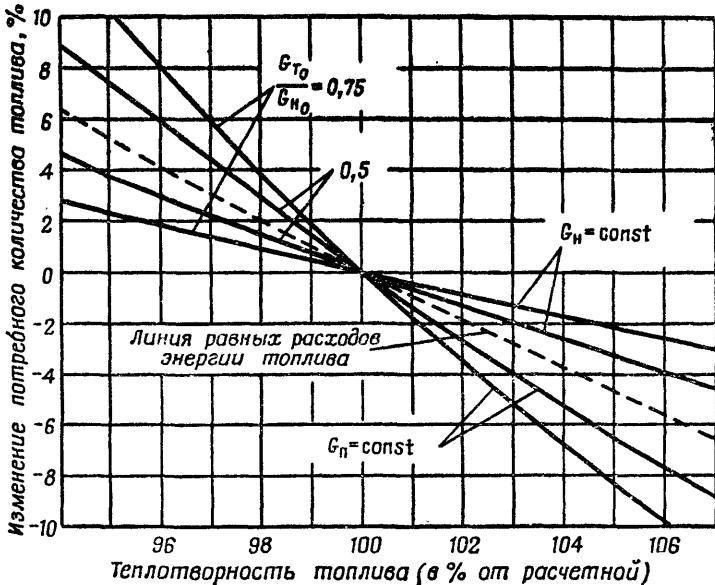


Рис. 19. Влияние теплотворности (а также факторов, от которых зависит к. п. д.) на потребное количество топлива для полета на одно и то же расстояние при одинаковом начальном полетном весе (линии $G_{\text{п}} = \text{const}$) или полезном грузе (линии $G_{T_0} = \text{const}$); 100% потребного количества топлива соответствует любому значению теплотворности, принятому за 100%

Таким образом, при полете на заданную (не максимальную) дальность или ограничении веса топлива не нужно стремиться применять дефицитные тяжелые авиакеросины, лучше использовать доступные топлива с меньшей плотностью и большей теплотворностью [76, 81].

Влияние температуры топлива

На располагаемый импульс топлива и зависящие от него характеристики полета иногда влияют и другие факторы, связанные с топливом. Так, при повышенной температуре широкофракционного топлива потери его от испарения через дренаж баков могут достигать нескольких процентов от веса топлива, что вызовет соответственно уменьшение дальности или ухудшение дру-

гих характеристик полета. В то же время понижение температуры топлива, благоприятное с точки зрения увеличения веса заправки топлива и уменьшения потерь от испарения, вызывает резкое повышение вязкости, что ведет к ухудшению распыла и снижению полноты сгорания топлива. В конечном счете

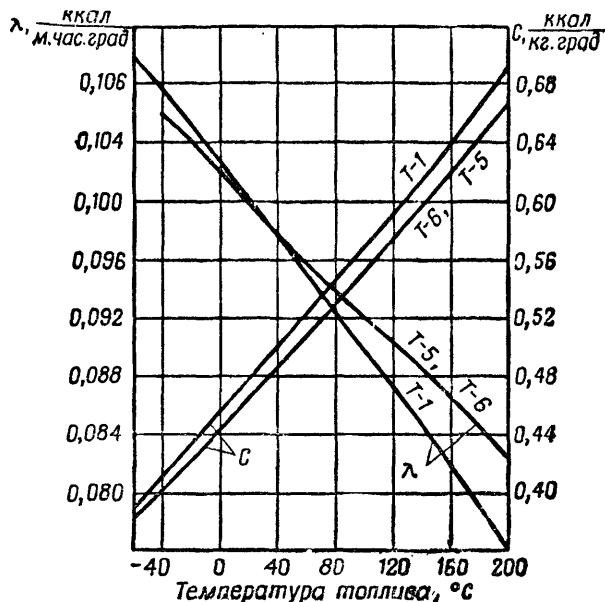


Рис. 20. Зависимость теплопроводности λ и теплоемкости C реактивных топлив от температуры

дальность полета не увеличивается, а уменьшится. Это может, по-видимому, проявиться зимой в холодных районах при применении топлива $T-1$ и более тяжелых топлив типа $T-6$, так как их вязкостно-температурская характеристика круче, чем у топлив типа $TС-1$, $T-7$ и широкофракционных топлив (см. рис. 15).

При большой сверхзвуковой скорости полета к значениям теплотворности следует вводить положительную поправку на количество тепла, сообщенное топливу в результате его нагрева в топливной системе самолета $\Delta q = C_2 t_2 - C_1 t_1$ (теплоемкость C и температура t с индексом 2 относится к топливу на входе в двигатель, а с индексом 1 — при заправке самолета; зависимость теплоемкости от температуры дана на рис. 20) [14, 26, 81].

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ТОПЛИВА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ САМОЛЕТА И ДВИГАТЕЛЯ

Факторы, вызывающие неисправности

Неполадки и отказы в работе топливной системы самолета и двигателя, связанные с составом и свойствами топлива, могут быть вызваны возникновением кавитации, трудностями запуска двигателя

теля (особенно в полете), появлением в топливе кристаллов льда, загрязнением и коррозией топливной аппаратуры, фрикционным износом трущихся поверхностей топливных насосов. Часть указанных явлений обусловлена нагревом топлива в сверхзвуковом полете: температура топлива в баках за 1 час полета с числом $M = 2,5 \div 3$ достигает примерно 70°C , за 2 часа — 100°C , за 3 часа — $110 \div 120^\circ\text{C}$, а в ходе подачи к форсункам поднимается в теплообменниках и топливной аппаратуре ТРД еще примерно на 50°C (при снижении самолета — более чем на 100°C) [60, 73, 80].

Кавитация в топливной системе

С подъемом на высоту в топливной системе самолета может возникнуть кавитация: разрывы и паро-газовые пробки в потоке жидкого топлива, колебания давления, перебои в подаче. Явление кавитации связано с растворимостью воздуха и газов в топливе и с давлением насыщенных паров топлива. Объем растворенного воздуха в топливе независимо от давления воздуха обычно составляет 12—16% объема топлива. Вес растворенного в топливе воздуха пропорционален его давлению над топливом (закон Генри). Поэтому при наборе высоты вес растворенного воздуха в топливе уменьшается пропорционально падению давления в топливных баках; избыток воздуха выделяется в виде пузырьков. Объем выделяемого воздуха достаточно велик (рис. 21), он может достигать нескольких сотен литров на каждые 1000 л топлива (если учитывать расширение воздуха вследствие уменьшения давления с высотой).

Элементарный объем выделяемого воздуха $dV = -\frac{dp_H}{p_H} V_p$ (где V_p — объем растворенного воздуха). При постепенном снижении давления от p_0 до p_H весь выделенный объем (увеличивавшийся по мере роста высоты)

$$V_{\text{непр}} = - \int_0^H \frac{dp_H}{p_H} V_p = V_p \ln \frac{p_0}{p_H}. \quad (3.9)$$

Выделение из топлива избыточного воздуха при наборе высоты, как правило, запаздывает, особенно при большой скорости подъемности. На некоторой высоте (обычно не ниже 8000 м) это приводит к кратковременному вскипанию топлива. В этом случае одновременно выделяется объем:

$$V_{\text{одновр}} = V_p \left(\frac{p_0}{p_H} - 1 \right). \quad (3.10)$$

Происходящая при этом кратковременная кавитация в трубопроводах, вызывающая колебание давления топлива, не представляет практической опасности, если только она не явится поводом к неправильным действиям экипажа.

Внутрь выделяющихся пузырьков воздуха испаряется топливо.

Когда при наборе высоты полета внешнее давление понижается настолько, что оказывается равным или меньше давления насыщенных паров, испарение топлива внутрь пузырьков становится очень интенсивным, пузырьки резко расширяются, начинается кипение. В отдельных участках топливной системы самолета давление может быть ниже внешнего давления (например, на входе в подкачивающие и перекачивающие насосы). Из-за этого кавитация

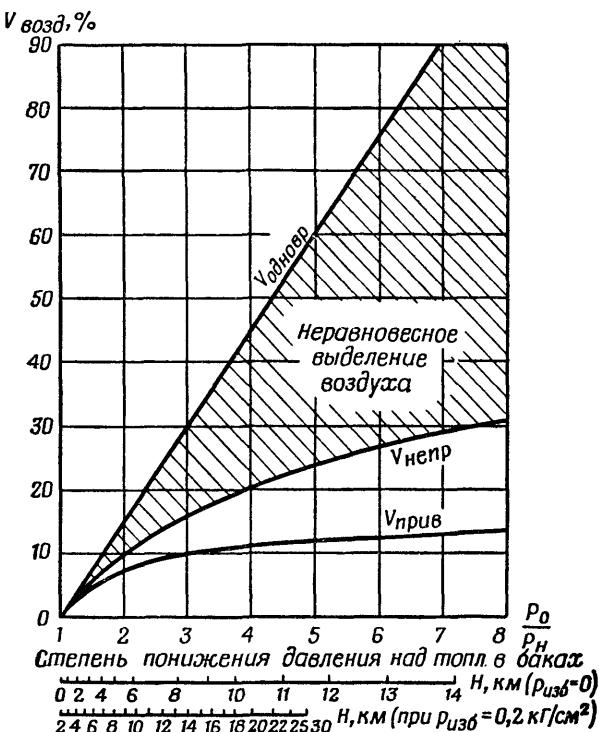


Рис. 21. Объем воздуха (в % к объему топлива), выделяемый из топлива при наборе высоты (если растворимость воздуха в топливе составляет 15% по объему): $V_{прив}$ — объем воздуха, приведенный к нормальному давлению 760 мм рт. ст., $V_{непр}$ — при непрерывном выделении избыточного воздуха в ходе подъема, $V_{одновр}$ — при одновременном выделении всего избыточного воздуха после набора высоты

ция топлива в этих участках трубопроводов начинается на меньшей высоте, чем кипение топлива в баках. При кавитации по трубопроводам движется сжимаемая смесь жидкости с газами и парами топлива. В ней легко возникают резкие пульсации давления, которые вызывают износ насоса, колебания и перебои в расходе топлива, вплоть до прекращения его подачи.

Из топлив для ВРД опасное с точки зрения кавитации давле-

ние насыщенных паров при открытой топливной системе может быть у топлив широкого фракционного состава в летнее время (около 100 мм рт. ст. и выше). Важнейшие меры против кавитации — применение топлив с низким давлением насыщенных

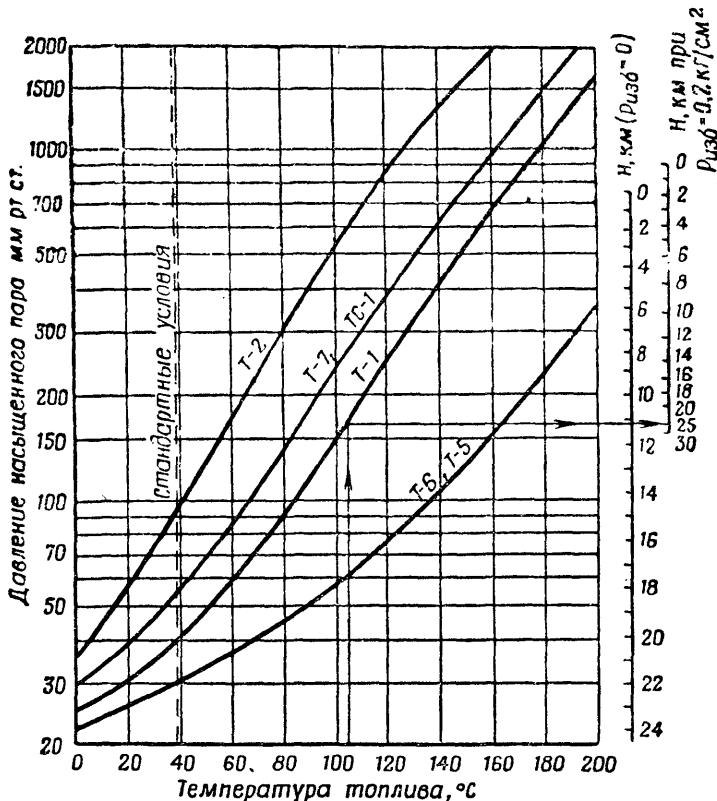


Рис. 22. Влияние температуры топлива на давление насыщенного пара; справа указаны высоты полета, на которых закипает топливо при открытом дренаже баков ($p_{изб}=0$) и при наддуве баков ($p_{изб}=0,2 \text{ кГ}/\text{см}^2$)

ных паров, защита топлива от нагрева солнечными лучами, устройство закрытых топливных систем с повышенным давлением, увеличение рабочего давления (кавитационного запаса) подкачивающих и перекачивающих насосов. Они особенно необходимы для самолетов с большими сверхзвуковыми скоростями полета, когда нагрев топлива может вызвать резкое повышение давления насыщенных паров (рис. 22). Однако избыточное давление в топливной системе не устраниет кавитацию, а отодвигает ее до больших высот и более высоких температур топлива (на рис. 22 две шкалы справа). Высокое давление насыщенного

пара при повышении температуры топлива в баках до 80—100° С требует увеличения прочности и жесткости баков.

В случае заполнения топливных баков инертным газом картина кавитации в принципе не изменяется, но высота полета, на которой возникает кавитация, может сместиться в ту или иную сторону. Так, при использовании углекислого газа, растворимость которого в топливе примерно втрое больше по сравнению с воздухом, возрастает вероятность кавитации на меньших высотах [35, 58, 81].

Трудности запуска двигателя

Для запуска двигателя в полете необходимо, во-первых, чтобы электрический разряд обеспечил воспламенение топлива в пусковом устройстве и, во-вторых, чтобы поступление горячих газов от пускового устройства во встречный поток воздуха, направленный к форсунке (см. рис. 16), обеспечило разогрев, испарение и воспламенение рабочего топлива. Выполнение первого требования достигается путем усовершенствования конструкции пусковых устройств и применения пусковых топлив с высоким давлением насыщенного пара (неэтилированных бензинов). Однако на больших высотах (порядка 12 000—15 000 м и более) не выполняется второе требование: горение обычного пускового топлива протекает вяло и дает так мало тепла, что оно не способно поджечь рабочее топливо. Поэтому пусковые устройства снабжаются кислородной подпиткой, а перед запуском в полете производится снижение до высоты, на которой он гарантирован [2, 87, 112].

Кристаллы льда

В условиях эксплуатации авиационной техники зимой, при температуре топлива ниже 0° С (а при длительных высотных полетах — и летом), в нем могут появляться кристаллы льда. Они забивают топливный фильтр двигателя перед насосом и резко снижают его пропускную способность, что приводит к отказу двигателя. Появление кристаллов льда в топливе может быть вызвано тремя основными причинами: попаданием в него инея, конденсацией влаги из воздуха и выделением растворенной в топливе воды.

При заполнении резервуара, цистерны или топливного бака самолета в топливо может попасть осевший на их стенках иней. Кроме того, иней, образовавшийся на стенах емкости выше уровня топлива, сползает в топливо при нагреве емкости солнечными лучами.

Из воздуха, проникающего в емкость через дыхательные клапаны или дренаж, на поверхности холодного топлива могут конденсироваться водяные пары; это происходит при наступлении теплой погоды. Конденсация продолжается в течение одних-двух суток, пока температура топлива не повысится. Образующиеся при этом мелкие кристаллики льда (типа снежинок) медленно оседают в топливо, оставаясь в нем длительное время во взвешен-

ном состоянии (их плотность почти равна плотности холодного топлива).

В топливе растворено небольшое количество воды; ее растворимость уменьшается с понижением температуры топлива и внешнего давления. Так, в топливе Т-1 при температурах от +10 до 0° С может быть растворено до 60—80 г воды на 1 тонну, а при температуре —20° С в 2—3 раза меньше (рис. 23). При охлаждении топлива, например, в холодную погоду при заполнении наземных емкостей теплым топливом из подземных резер-

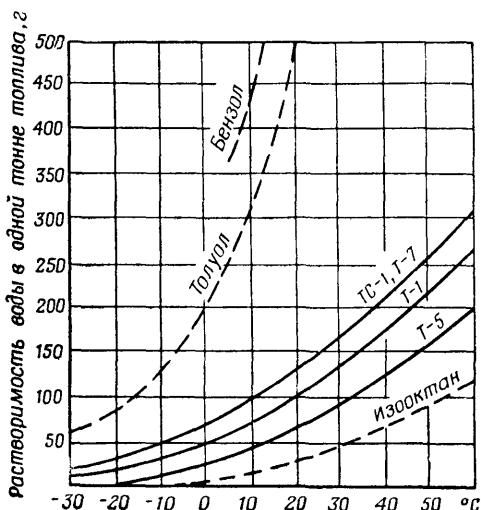


Рис. 23. Растворимость воды в одной тонне при различной температуре топлива (при влажности воздуха 100%)

вуаров или летом в дозвуковом полете на большой высоте, избыток воды выделяется в виде мелких капелек, которые при отрицательной температуре замерзают. Ароматические углеводороды растворяют в несколько раз больше воды, чем углеводороды других групп (это также видно из рис. 23). Они являются главными источниками выделения кристаллов льда при понижении температуры топлива.

Растворимость воды в топливе пропорциональна давлению водяного пара над топливом, т. е. влажности воздуха. Между влажностью воздуха и содержанием воды со временем (за несколько часов) устанавливается равновесие. Содержание растворенной воды в топливе соответствует кривым, изображенными на рис. 23, только при 100% влажности воздуха (например, при 20° С и влажности 100% в 1 тонне топлива Т-1 содержится около 100 г воды). При меньшей влажности воздуха постепенно устанавливается новое равновесие (например, в 1 тонне топлива Т-1 при 20° С и влажности воздуха 40% — 40 г воды). Если влажность воздуха близка к нулю, то вся влага из топлива постепенно переходит в атмосферу и рассеивается, опасность образования кристаллов исчезает. Но если влажность воздуха превышает 100% (дождь, туман), то топ-

ливо не только насыщается влагой, но и поглощает избыточное количество влаги (сверх предела растворимости), которое выделяется в виде кристаллов льда или в виде отстоя на дне емкости. Чем больше высота налива топлива, меньше поверхность контакта его с воздухом и выше вязкость топлива, тем медленнее достигается равновесие.

Из всего сказанного видно, что особую осторожность нужно проявлять в условиях резкого колебания температуры топлива и воздуха. Зимой перед заправкой топлива в баки, а также при длительном нахождении его в баках самолетов необходимо тщательно проверять, не появились ли в нем кристаллы льда. Наличие кристаллов льда в баках самолета обнаруживается при предполетной подготовке и перед вылетом путем слива и осмотра отстоя топлива, а на некоторых типах самолетов — при осмотре топливного фильтра после опробования двигателя [60, 79, 115].

Антиобледенительные присадки

Эффективным средством против образования кристаллов льда являются антиобледенительные присадки — этилцеллозольв и некоторые спирты. Они повышают растворимость воды в топливе, не дают ей выпадать из раствора при понижении температуры топлива. Этилцеллозольв — бесцветная, прозрачная жидкость со слабым эфирным запахом, плотность ее 0,930—0,935 при 20° С. Жидкость спиртовой основы — бесцветная или слабо-желтая, с более резким запахом, несколько более тяжелая, ее плотность 1,05—1,06 при 20° С. Допустимое содержание воды в обеих присадках (до добавки в топливо) не более 0,5 %. Обводненную присадку применять нельзя, она может внести в топливо избыточную влагу и вызвать образование кристаллов. Обе присадкиядовиты: пары их вызывают головную боль, а попадание в пищеварительный тракт — сильное отравление.

Антиобледенительную присадку добавляют в топливо в количестве 0,1—0,3 % (1—3 кг на 1 тонну топлива) в зависимости от температуры воздуха (у земли): 0,1 % при температуре до —15° С; 0,2 % при —15—25° С; 0,3 % при температуре ниже —25° С. Она способна удерживать в растворенном состоянии около 4 % воды по отношению к своему весу, т. е. до 120 г в 1 тонне топлива, когда содержание антиобледенительной присадки равно 0,3 %. Практически количество воды в топливе всегда меньше этой величины. Для введения антиобледенительной присадки используются специальные дозаторы. Если в топливе имелись кристаллы льда, то при добавке антиобледенительной присадки и перемешивании в течение 20—30 мин они растворяются. При появлении в емкости водного отстоя антиобледенительная присадка переходит из топлива в воду, так как в воде она растворяется лучше. Содержание ее в топливе определяют с помощью рефрактометра — по коэффициенту преломления света водной вытяжкой, приготовленной в делильной воронке [1, 35, 115].

Осадки и коррозия в топливной системе

Основной проблемой, возникающей в результате нагрева топлива в полете, является осадкообразование, наиболее интенсивное в пределах температуры 130—200°С (рис. 24).

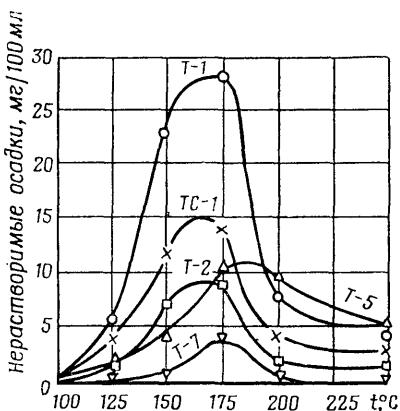
На горячих поверхностях (особенно бронзовых), соприкасающихся с жидким топливом, образуются твердые нагароподобные отложения, а в массе топлива — взвесь мельчайших твердых частиц, которые забивают фильтры, попадают в каналы и зазоры топливной аппаратуры. В дренажных отверстиях осадки иногда откладываются в виде рыхлой массы. Для предотвращения осадкообразования производится лучшая очистка топлива от источников нестабильности — гетероарганических соединений и непредельных углеводородов, а также добавка присадки (например, ТП или П) в количестве нескольких сотых долей процента.

На рис. 25 показаны результаты испытания одного и того же топлива ТС-1, не содержащего и содержащего присадку, на установке, имитирующей топливную систему. Однако очень глубокая очистка топлива может вызвать ухудшение его стабильности вследствие удаления естественных антиокислителей (дисульфидов, фенолов и др.) [108].

Рис. 24. Влияние температуры на термостабильность некоторых реактивных топлив

Опасное для регулирующих узлов загрязнение топливной аппаратуры студенистыми продуктами коррозии и смолистыми веществами появляется в тех случаях, когда топливо содержит недопустимое количество меркаптановой серы, органических кислот, нафтеновых мыл, фактических смол, что может быть следствием упущений в контроле качества топлива.

В последние годы приходится обращать внимание еще на один вид коррозии — микробиологическую [93]. В нефтепродуктах практически всегда имеются бактерии, споры плесневых грибков, но они проявляют себя только в условиях значительной влажности и относительно высокой температуры топлива. Их интенсивное размножение происходит на поверхности контакта топлива с водой, на влажных стенах топливных емкостей самолета, заправщика, склада и т. д. В процессе биологического обмена веществ они выделяют кислые органические вещества и, возможно, сероводород и серную кислоту, которые могут вызвать серьезные повреждения, особенно при длительном воздействии внутри застойных участков топливной системы (вплоть до по-



явления течи кессонных баков). Кроме того, бактериальная масса может вызвать загрязнение автоматики, забивку фильтров.

Основными мерами борьбы с микробиологической коррозией являются регулярный слив и контроль отстоя, тщательная промывка систем (особенно в условиях тропического климата), а также применение биоцидных присадок к топливу. Известно, что биоцидное действие оказывает антиобледенительная присадка [1, 35, 58, 60, 95, 107, 108, 123].

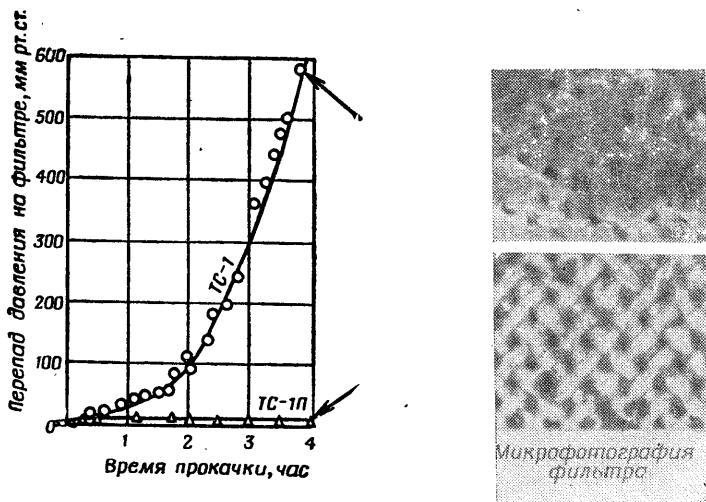


Рис. 25. Влияние присадки, повышающей термостабильность топлива, на прокачиваемость топлива (при 180° С) и состояние фильтра после прокачки

Фрикционный износ насосов

Противоизносные свойства топлива определяются в основном поверхностью активностью, т. е. способностью топлива или каких-либо содержащихся в нем веществ адсорбироваться на поверхности металла. Тем самым предотвращается «оголение» и сухое трение деталей топливного насоса на участках высокого контактного давления, выжимающего жидкость из зазора. Наиболее высокой поверхностной активностью обладают вещества, молекулы которых являются электрическими диполями. Чем больше дипольный момент молекул, тем прочнее они «прилипают» к поверхности, электрическое поле которой не компенсировано. Углеводороды топлива обладают небольшим дипольным моментом, их противоизносные свойства низкие. Из веществ, которые естественно могут содержаться в нефтяном топливе, большими дипольными моментами молекул отличаются смолы, органические кислоты и другие кислородсодержащие со-

единения, а также сераорганические и азоторганические соединения, т. е. те вещества, присутствие которых вредно с точки зрения термической стабильности и коррозионных свойств топлива. Глубокая очистка топлива от этих веществ снижает его противоизносные свойства. Так, гидроочищенное топливо Т-7 по противоизносным свойствам хуже топлива сорта ТС-1, которое вырабатывается из того же сырья. По-видимому, существует такое оптимальное содержание примеси гетероорганических соединений в топливе, которое обеспечивает смазку насосов и не опасно с точки зрения осадкообразования.

Некоторое влияние на противоизносные свойства оказывает также вязкость топлива. В состав менее вязких топлив входят вещества с меньшим молекулярным весом, молекулы которых имеют меньшие размеры и, следовательно, меньший дипольный момент. Поэтому при одинаковой степени очистки и отсутствии противоизносных присадок меньше прочность граничной пленки, образуемой ими на поверхности металла. Кроме того, с уменьшением молекул повышается средняя скорость их хаотического теплового движения, способствующего разрушению (десорбции) граничной пленки.

Существенное улучшение противоизносных свойств реактивных топлив достигается путем введения нескольких сотых долей процента поверхноактивной присадки [109], молекулы которой обладают большим дипольным моментом. Такими присадками являются, в частности, те же ТП и П, повышающие термическую стабильность топлив. Топлива Т-2ТП и Т-2П обладают достаточными противоизносными свойствами и могут применяться на той технике, где топливо Т-2 с такой же вязкостью, но без присадки не обеспечивает надежной работы топливных насосов. Введение присадки в гидроочищенное топливо Т-7 компенсирует ухудшение противоизносных свойств, вызванное его «переочисткой».

Сложное влияние на смазку и износ деталей оказывает растворенный в топливе кислород. Реагируя при повышении температуры с топливом, он участвует в образовании полезных для граничной смазки гетероорганических соединений, но, окисляя металл в зоне высоких контактных нагрузок, способствует разрушению поверхности деталей. До температуры топлива 90—100°С (в объеме) преобладает усиление последнего эффекта, ускоряющего износ. При более высоких температурах топлива износ снижается, что объясняется, по-видимому, образованием большого количества поверхноактивных веществ во всем объеме топлива, в том числе таких, которые химически взаимодействуют с металлом и создают антифрикционный слой на его поверхности. Возможно также, что с повышением температуры положительную роль играет уменьшение растворимости и, следовательно, концентрации кислорода в топливе. Искусственное уменьшение содержания растворенного кислорода в топливе путем обработки топлива азотом существенно снижает износ насосов [1, 35, 49, 107, 108].

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ТОПЛИВА НА НАДЕЖНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОВОГО ТРАКТА ДВИГАТЕЛЯ

Топливо оказывает три вида воздействия на газовый тракт двигателя: тепловое, загрязняющее (нагарообразование) и химическое (коррозия).

Тепловое излучение

Конвективная теплоотдача продуктов сгорания от свойств топлива практически не зависит. Лучистая же теплоотдача факела, не ослабляемая заградительным слоем воздуха, обусловлена сажи-

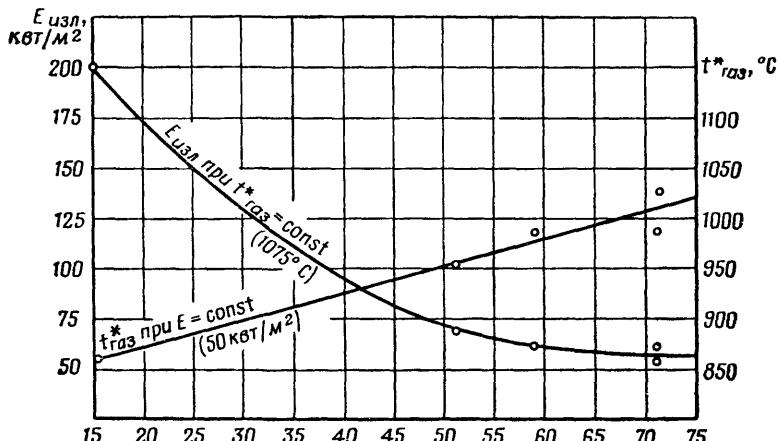


Рис. 26. Характер связи люминометрического числа топлива с излучаемой энергией пламени $E_{\text{изл}}$ (при $t^*_{\text{газ}} = \text{const}$) и температурой газа $t^*_{\text{газ}}$ на выходе модельной камеры сгорания (при $E_{\text{изл}} = \text{const}$)

стостью пламени и зависит от состава топлива (рис. 26). Для оценки топлив по интенсивности излучения их пламени за рубежом получила применение шкала *люминометрических чисел*. Их определяют на люминометре — диффузионной горелке, оборудованной приборами для измерения яркости пламени и создаваемого пламенем прироста температуры. Чем больше прирост температуры при одинаковой яркости, тем лучше считается топливо, выше его люминометрическое число.

Наиболее высокие люминометрические числа (выше 100), т. е. слабое излучение, имеют нормальные и слаборазветвленные парафины и нафтины (за 100 принят изооктан 2,2,4-триметилпентан), низкие люминометрические числа (ниже 20), т. е. сильное излучение, — ароматические, нафтиено-ароматические, бициклические ароматические (за 0 принят тетралин — бициклический нафтено-ароматический углеводород). В середине шкалы находятся сильно разветвленные изопарафины и нафтины, бициклические нафтины. Чем молекула «компактней», тем больше склонность к сажеобразованию, сильнее излучение, ниже люминометрическое число.

Имеются данные о соответствии между результатами испытания топлив на люминометре и в камерах сгорания ТРД: чем

выше люминометрическое число, тем меньший тепловой поток испускается факелом и ниже температура стенок жаровой трубы. Это считается существенным в плане обеспечения усталостной прочности теплонапряженных камер сгорания. Современные реактивные топлива имеют люминометрические числа 40—70. Для топлива сорта Т-1 характерные значения люминометрического числа 50—55 (но отдельные образцы бывают ниже), для топлив сортов ТС-1 и Т-7 — порядка 60—70. Эти числа представляют собой «смесительную» характеристику углеводородов, входящих в состав топлива; углеводороды с низким люминометрическим числом оказывают более резкое влияние на этот показатель смеси. При больших скоростях полета ($M > 3$) ввиду повышения температуры пламени предполагается, что могут потребоваться топлива с люминометрическим числом около 100.

Недостатком люминометрической шкалы является ее неравномерность: в нижней части шкалы почти одинаково оцениваются топлива, значительно отличающиеся по реальному излучению в двигателях, а верхняя часть шкалы имеет рекламный характер — огромные увеличения люминометрических чисел соответствуют практически несущественным изменениям лучистого потока в реальных условиях. В связи с этим предлагается вместо люминометрического числа использовать индекс черноты пламени, связанный с люминометрическим числом обратной зависимостью. Этот индекс пропорционален концентрации сажи в пламени и термодинамической степени черноты пламени, обычно используемой в тепловых расчетах [94, 107, 123, 138].

Нагар

При близком к форсунке расположении факела нагар образуется у ее сопла и распыл топлива ухудшается или конус его искается. В результате жидкое топливо попадает на стенки жаровой трубы и сгорает на них, вызывая перегрев стенок и интенсивное образование нагара, состоящего в основном из обуглившихся остатков ароматических углеводородов, смол и т. д. Значительное содержание ароматических углеводородов при этом способствует перегреву, короблению и прогару стенок жаровой трубы и других деталей не только вследствие более интенсивного излучения факела, но и поглощения черной поверхностью стенки. Частицы нагара, отрывающиеся от стенок жаровой трубы, ударяются о лопатки турбины и вызывают преждевременный износ их (эррозию).

Плотная пленка зольного шлака образуется после сгорания микропримесей металлов, содержащихся в топливе в виде солей и, возможно, в составе сложных металлогорганических соединений. В расплавленном или размягченном состоянии окислы металлов и соли прилипают к деталям, а затем, остывая, затвердевают [34, 69, 106].

Газовая коррозия

Содержание в золе топлива пятиокиси ванадия V_2O_5 , а также, возможно, других металлов вызывает коррозию и прогар

жаростойких сплавов на железной и никелевой основе.

Микропримесь ванадия (0,00001—0,01 %) входит в состав главным образом высокомолекулярных азотсодержащих соединений, которые концентрируются в высококипящих фракциях нефти и в значительной мере удаляются при очистке нефтепродуктов. Однако остающееся ничтожно малое количество ванадия, по-видимому, может играть роль переносчика кислорода — катализатора газовой коррозии, может быть непосредственной причиной коррозии и прогара жаростойких материалов. Образующаяся после сгорания пятиокись ванадия (температура плавления 685° С) в жидким виде осаждается в газовом тракте и вследствие переменной валентности ванадия превращается в четырехокись $V_2O_5 \rightarrow V_2O_4 + O$; атомарный кислород идет на окисление железа или никеля. При контакте с избытком кислорода в газовом тракте четырехокись снова регенерируется в пятиокись, опять распадается и т. д. Незначительное содержание в золе топлива сульфата натрия Na_2SO_4 или окиси натрия Na_2O усиливает ванадиевую коррозию железа в десятки раз. Вопрос о ванадиевой и подобной ей коррозии и мерах борьбы с ней недостаточно разработан. Предотвращение этого вида коррозии достигается отбраковкой топлив при испытаниях.

Длительное коррозионное действие сернистого газа, об разующегося при сгорании соединений серы (в некоторых топливах ее довольно много — до 0,25 % в виде неактивных соединений) может вызвать прогар лопаток турбин, если их температура превышает 900—950° С [35, 44, 50, 60, 81].

ОГНЕОПАСНОСТЬ ТОПЛИВА

Самовоспламенение

Причиной ложара может быть самовоспламенение топлива или вспышка его паров от внешнего источника — пламени, электрической искры. Непосредственно процесс самовоспламенения углеводородного топлива происходит только в паровой фазе в результате взрыва гидроперекисей, которые образуются при контакте горячих паров топлива с кислородом. Практически мгновенное образование и самовоспламенение топливо-воздушной смеси происходят при попадании керосина на раскаленную металлическую поверхность с температурой выше 350—400° С, например на реактивное сопло или части турбины, разрушенной при аварии.

Склонность топлива к самовоспламенению не следует путать с возможностью вспышки от внешнего пламени. Легче самовоспламеняются более тяжелые углеводороды, они по своей природе легче окисляются, образуя взрывчатые перекиси: керосины примерно на 100° С ниже, чем бензины. Еще легче самовоспламеняются гидромасло, близкое по углеводородному составу к дизельному топливу, и смазочное масло, попадающее на горячие детали

двигателя. При авариях и повреждениях обычно они образуют первые очаги пламени, а от них уже загорается топливо.

Опасность самовоспламенения появляется в условиях сверхзвукового полета на больших числах M при нагреве паров топлива в баках до 200°C и выше, если в надтопливном пространстве баков содержится кислород. В связи с этим необходим наддув баков нейтральным газом (например, азотом). Однако следует иметь в виду, что при подъеме самолета и нагреве топлива из него выделяется воздух, обогащенный кислородом (последний растворяется в топливе в большем количестве, чем азот). Это повышает опасность самовоспламенения паров внутри топливных баков. Радикальной мерой, устраниющей опасность самовоспламенения, может быть предварительное понижение концентрации кислорода в топливе путем продувки его азотом [52].

Воспламенение от внешнего источника

Легко испаряющиеся топлива опаснее при воздействии внешних источников воспламенения — неосторожном обращении с огнем, разрушении электропроводки, разряде статического электричества. Топливо загорается от внешнего источника только при температуре, превышающей температуру вспышки, когда над ним образуется достаточно богатая для воспламенения смесь паров топлива с воздухом. Так, пары над топливом T-1 взрывоопасны, если температура топлива не ниже $25\text{--}30^{\circ}\text{C}$, над топливом TC-1 — не ниже $15\text{--}25^{\circ}\text{C}$, над топливом T-2 (содержащем бензин), начиная с температуры минус $10\text{--}20^{\circ}\text{C}$. При более низкой температуре от искры или кратковременно поднесенного плавления топлива не загораются.

Теоретически существует также верхний температурный предел воспламенения топлива (для T-1 около 65°C , для TC-1 $55\text{--}60^{\circ}\text{C}$, для T-2 $40\text{--}45^{\circ}\text{C}$), при котором над ним образуется чрезмерно богатая смесь, не способная загореться, причем нижний и верхний пределы воспламенения сближаются при понижении давления в баках с увеличением высоты полета. Однако практического значения это не имеет, так как сохраняется вероятность воспламенения топлива при температуре выше теоретического верхнего предела из-за упомянутого выше выделения кислорода из топлива при наборе высоты [78].

Воспламенение от статического электричества

Во время наполнения резервуаров, цистерн топливозаправщиков и топливных баков при большой скорости налива происходит электризация топлива вследствие трения о материал фильтров и стенки шлангов. Топливо, как правило, приобретает положительный заряд (отдает электроны при трении). В сухую погоду напряжение на поверхности топлива в баках к концу заправки составляет тысячи вольт, что может вызвать мощный искровой раз-

ряд. Это происходит в результате накопления статического электричества из-за низкой электропроводности сухого топлива. Заряд влажного топлива (содержащего расгвorenную или эмульсионную воду) в несколько раз меньше. Если температура топлива при наливе резервуаров, при выдаче в цистерны или заправке самолетов выше взрывоопасного предела, то искровой разряд статического электричества может вызвать пожар.

Проблема электризации топлива усугубилась в результате мер по повышению термостабильности топлив. При глубокой очистке топлив от электрически полярных гетероорганических соединений уменьшается его электропроводность, а некоторые из присадок, вводимые в топливо для улучшения его термостабильности и смазывающих свойств, усиливают его электризацию.

В качестве меры против накопления статического электричества, его разряда и обусловленной этим пожарной опасности можно рекомендовать уменьшать скорость налива последних 20—25% топлива при малой влажности воздуха. Кроме обычного заземления самолета и топливозаправщика следует соединять проводником заправочный кран с горловиной бака. Повысить электропроводность топлива и обеспечить быстрое рассеивание электростатического заряда можно путем введения в топливо специальных присадок; известно, что в некоторых иностранных топливах содержится присадка *антистатин* [107, 120].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАССЧИТАННЫХ НА БОЛЬШИЕ СВЕРХЗВУКОВЫЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА¹

Основные проблемы

С увеличением скорости полета до $M=3 \div 4$ и выше все более острыми считаются проблемы обеспечения термостабильности топлива, использования топлива в качестве охлаждающего агента на летательном аппарате и повышения энергетических характеристик топлива. Рассматриваются следующие перспективные решения этих проблем:

- радикальное улучшение нефтяных топлив типа керосина путем глубокой гидрогенизации и использования полифункциональных присадок;
- создание углеводородных топлив, поглощающих тепло при химических реакциях в теплообменнике самолета;
- применение ожигенных углеводородных газов, в том числе жидкого природного газа;
- применение жидкого водорода;

¹ По материалам иностранной печати.

- применение неуглеводородных топлив для кратковременного форсирования ВРД;
- использование ядерной энергии [118, 119, 120, 123, 129, 132, 138, 141].

Улучшение нефтяных топлив

Производство топлив путем каталитического гидрокрекинга тяжелого нефтяного сырья обеспечивает возможность существенного повышения термостабильности, уменьшения коррозионной активности, интенсивности сажеобразования и излучения пламени, т. е. тех свойств, которые считаются решающими при $M=3\div 4$. Оно оказывается возможным благодаря значительному выходу недорогого технологического водорода как побочного продукта ряда нефтехимических процессов. Однако некоторые свойства топлива в результате гидрогенизации ухудшаются. В топливе уменьшается содержание поверхностноактивных веществ и естественных антиокислителей, в результате чего понижаются смазывающие свойства топлива, а термостабильность растет меньше, чем этого следует ожидать. Эти недостатки могут быть компенсированы введением присадок; они могут обеспечить также дальнейший рост термостабильности, дать антикоррозионный эффект и др. Такими присадками, в частности, считаются сополимер эфиров метакриловой кислоты, изопропилоктадециламин $C_3H_7NH(C_{18}H_{37})$.

Недостатком гидрированных топлив является их невысокая плотность (примерно на уровне топлива ТС-1), что в какой-то мере может быть компенсировано несколько большей теплотворностью за счет предельной гидрогенизации топлива и облегчением фракционного состава. При этом возможно некоторое повышение температуры начала кристаллизации топлива [73, 107, 118, 123, 129, 138].

Топлива для химического охлаждения

Теплопоглощающие топлива предполагается использовать для химического охлаждения оборудования и систем перспективных самолетов с числом $M>4$ (температура заторможенного воздуха в стратосфере при $M=4$ равна 625°C , при $M=5$ около 1000°C). Наиболее подходящими считаются эндотермические реакции крекинга парафинов и дегидрогенизации нафтенов, например метилциклогексана C_7H_{14} (катализаторы — платина и окись алюминия) и декалина $C_{10}H_{18}$, обеспечивающие поглощение 1080—1100 ккал/кг (вместе с испарением). Таким образом, теплообменники самолета должны превращаться в нефтехимические реакторы. Процесс охлаждения при этом регенеративный, поглощаемая топливом энергия поступает в двигатель. Однако требуется решение ряда сложных вопросов — предотвращения образования отложений в теплообменнике-реакторе, пригодности для непосредственного использования в двигателе продуктов превращения исходного топлива [130, 132, 142].

Криогенные топлива

Использование на сверхзвуковых самолетах криогенных топлив — жидкого углеводородных газов и жидкого водорода — потребует применения тепловой изоляции, увеличения веса и объема топливной системы и сопряжено с потерей части топлива. Какие же качества криогенных топлив позволяют считать их перспективными? Это прежде всего их хладоресурс, обеспечивающий эффективное охлаждение самолетов, и термостабильность (чрезвычайно высокая для метана и абсолютная для водорода), затем высокие энергетические характеристики и хорошие огневые свойства (высокая скорость горения, весьма низкое излучение пламени). Природный газ, основную часть которого составляет метан, намного дешевле современных и, тем более, перспективных нефтяных авиационных топлив. Водород относительно дорог, но из года в год стоимость его снижается.

Метан (CH_4) как топливо имеет следующие основные свойства: температура кипения $-161,5^\circ\text{C}$, плотность при этом 0,424, теплота парообразования 123 $\text{kкал}/\text{кг}$, температура замерзания $-182,5^\circ\text{C}$. Темплота образования метана (газообразного) — 1110 $\text{kкал}/\text{кг}$. Теплотворность газообразного метана 11 980 $\text{kкал}/\text{кг}$, жидкого 11 820 $\text{kкал}/\text{кг}$ (на 14—15% выше керосина). Стехиометрический коэффициент метана с воздухом 17,23, максимальное количество тепла на 1 кг воздуха в расчете на газообразный метан 695 $\text{kкал}/\text{кг}$ (на 1,5% ниже керосина). Жидкий водород, как горючий компонент ракетного топлива рассмотрен в гл. 5; его энергетические показатели даны в табл. 3 и 5. По сравнению с керосином теплотворность жидкого водорода в 2,7 раза больше, а максимальное количество тепла на 1 кг воздуха в расчете на газообразный водород 835 $\text{kкал}/\text{кг}$ (больше на 18%). Плотность жидкого водорода в 11—12 раз меньше, чем керосина. Данные по весовой теплотворности показывают целесообразность использования обоих топлив в качестве «маршевых», обеспечивающих меньший удельный расход по сравнению с керосином при длительном полете в атмосфере [127, 141].

«Разгонные» топлива

Жидкий водород может рассматриваться и как «разгонное» топливо, которое обеспечивает форсирование тяги при $\alpha=1$ за счет большего подвода тепла на единицу расхода воздуха по сравнению с обычными углеводородными топливами. «Разгонным» топливом могут служить также высококалорийные бороводороды: пентаборан, декаборан ($H_u/l_0 \approx 1220 \text{ ккал}/\text{кг}$ воздуха), а также некоторые низкокалорийные топлива, требующие малого количества воздуха для горения, т. е. с малым стехиометрическим коэффициентом l_0 . К числу последних относятся азотсодержащие топлива — диметилгидразин ($H_u/l_0 = 778 \text{ ккал}/\text{кг}$ воздуха), гидразин ($H_u/l_0 = 920 \text{ ккал}/\text{кг}$ воздуха) металлы — магний, литий, алюминий (H_u/l_0 соответственно 2080, 2050, 1900 $\text{kкал}/\text{кг}$ воздуха). Их эффект объясняется таким увеличением расхода топлива, при котором углеводороды не способны гореть. При этом дальность на установившемся режиме полета резко снижается; при длительном маршевом полете в атмосфере разгонные топлива менее эффективны, чем керосин. Но форсирование тяги при кратковременном использовании таких топлив, в том числе в виде добавки к основному топливу, может обеспечить быстрый разгон летательного аппарата [35, 73, 86, 103].

Ядерное топливо

Как в газотурбинном, так и в прямоточном двигателе может быть применен для нагрева воздуха атомный реактор или связанный с ним радиатор вместо обычной камеры горения. Реализации этих проектов препятствует опасность загрязнения атмосферы радиоактивными веществами [47, 73, 119].

Глава 4

АВИАЦИОННЫЕ БЕНЗИНЫ

ОСОБЕННОСТИ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ТРЕБОВАНИЯ К ТОПЛИВУ

Специфика рабочего процесса

Бензины являются топливом главным образом поршневых двигателей с искровым зажиганием. Требования к качеству современных сортов авиабензинов обусловлены особенностями именно этого класса двигателей. Для использования в двигателях других классов выбирают наиболее подходящие сорта бензинов из числа предназначенных для поршневых двигателей. Характерной особенностью рабочего процесса поршневых двигателей является цикличность. Она накладывает жесткие ограничения на располагаемое время смесеобразования, воспламенения и сгорания (сотые доли секунды). Поэтому испаряемость топлива и склонность его к самовоспламенению (детонации) играют решающую роль в реализации термодинамического цикла поршневых двигателей и обеспечении их нормальной работы [11, 60, 81].

Испаряемость

Двигателям с искровым зажиганием для обеспечения сгорания при постоянном объеме необходимо легко испаряющееся топливо — бензин, потому что он позволяет быстро (еще до подачи искры) получить однородную подготовленную к сжиганию топливо-воздушную смесь. На смесеобразование в рабочем цикле отводится время около 0,02 сек. Степень испарения бензина за этот промежуток времени существенно зависит от его фракционного состава и в свою очередь влияет на эксплуатационные характеристики двигателя. Запуск холодного двигателя при низкой температуре тем легче, чем ниже температура выкипания 10% объема топлива (эту фракцию называют пусковой). Авиабензины имеют температуру выкипания 10%-ной фракции не выше 75—88° С. Время подогрева двигателя и его приемистость (время перехода с малого газа на максимальный режим) сокращаются с понижением температуры выкипания 50%-ной фракции бензина. Для обеспечения требуемого времени приемистости 1—2 сек она должна быть не выше 105° С.

Полнота испарения бензина и равномерность состава смеси по цилиндрам двигателя зависят от температуры выкипания 90%-ной фракции бензина. Если она оказывается высокой (выше примерно 145°C), то в некоторые цилиндры карбюраторных двигателей часть топлива со стенок трубопроводов попадает в виде жидкой пленки. В результате этого двигатель не развивает требуемой мощности, ухудшается его экономичность, а неравномерность состава смеси вызывает тряску. Температура выкипания 97,5%-ной фракции бензина (практически конца кипения) также оказывается на экономичности двигателя и, кроме того, влияет на нагарообразование, на разжижение масла в картере несгоревшим остатком топлива и в конечном счете на степень износа и срок службы двигателя. Опыт показал, что она не должна быть выше 180°C.

Чтобы бензин не закипал в жаркую погоду, температура начала его кипения должна быть не ниже 40°C. Во избежание кавитации в полете давление насыщенных паров бензина (при 38°C) не должно превышать 360 мм рт. ст. Для облегчения запуска авиационных двигателей в зимнее время нормируется также нижний предел давления насыщенных паров 220—240 мм рт. ст. [60, 81].

Детонационная стойкость

После зажигания топливо-воздушной смеси пламя за 0,002—0,003 сек распространяется по камере сгорания в виде фронта. Продукты сгорания, расширяясь, резко сжимают и за счет этого сильно разогревают еще не сгоревшую смесь впереди фронта пламени. В результате в ней идет быстрое окисление углеводородов и образуются легко взрывающиеся гидроперекиси. Если до конца сгорания смеси перекиси не успеют образоваться и взорваться, то двигатель будет работать нормально, но если взрыв перекисей опережает фронт нормального сгорания, то в цилиндре возникают ударные волны, происходит детонация с резкой теплоотдачей в стенки. Она вызывает перегрев и постепенное разрушение деталей цилиндро-поршневой группы.

Интенсивность образования гидроперекисей и соответственно возможность детонации определяются углеводородным составом бензина. Высокая детонационная стойкость свойственна изопарафинам (она тем выше, чем более разветвлен углеродный скелет их молекул), многим нафтенам и ароматическим углеводородам (последним — при работе двигателя на богатой смеси $\alpha=0,6 \div 0,8$). Низкой детонационной стойкостью отличаются нормальные парафины, в особенности с длинной цепочкой атомов углерода в молекуле. Существенно повышает детонационную стойкость бензина присадка антидетонатора — тетраэтилсвинца (порядка 0,3%). Он замедляет процесс образования взрывчатых гидроперекисей.

Возникновение детонации зависит от режима и условий работы двигателя: давления наддува p_k , изменением которого регулируется мощность авиационного поршневого двигателя, коэффициента избытка воздуха α , температуры нагнетаемого в цилиндры воздуха t_k , температуры цилиндров двигателя t_n , причем их влияние переплетается. Наиболее полное представление об этом влиянии дают детонационные характеристики — зависимости предельно допустимого давления наддува p_k (соответствующего началу детонации) от состава смеси α при различных температурах t_k и t_n .

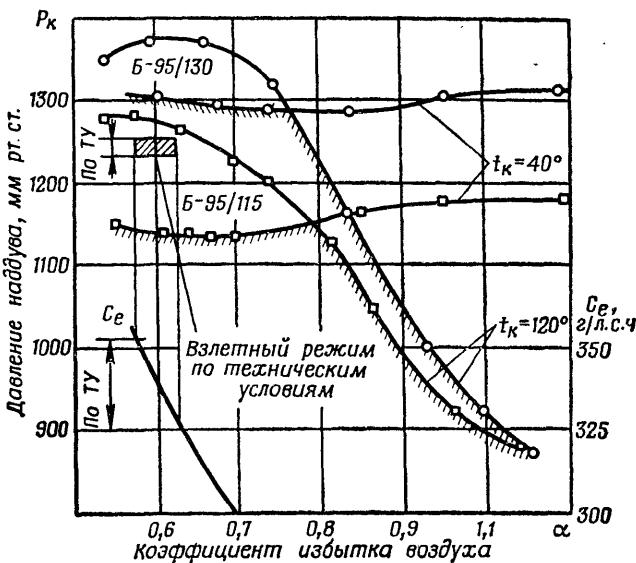


Рис. 27. Детонационные характеристики бензинов на двигателе АШ-82Т при двух вариантах жестких температурных условий: максимальных $t_n=250^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{возд. нар}}=40^{\circ}\text{C}$ ($t_k=120^{\circ}\text{C}$) и минимальных $t_n=150^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{возд. нар}}=-40^{\circ}\text{C}$ ($t_k=+40^{\circ}\text{C}$)

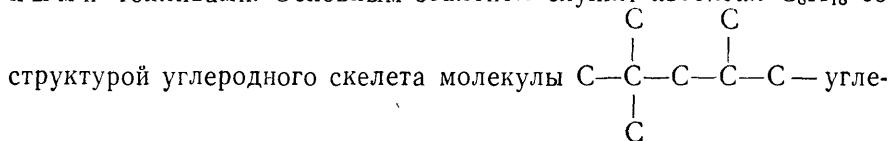
(рис. 27). При высоких температурах воздуха (выше 100°C — обычной величине t_k летом у земли после сжатия в нагнетателе) и высокой температуре цилиндров t_n максимум детонационной стойкости (максимальное p_k) получается при $\alpha=0,6 \div 0,7$ (богатая смесь) и минимум при $\alpha=1,0 \div 1,1$ (бедная смесь). Это позволяет при работе двигателя на богатой смеси устанавливать более высокий наддув и получать от двигателя большую мощность, чем при работе на бедной смеси. Снижение температурного режима до значений t_k и t_n , соответствующих зимним условиям работы двигателя, вызывает понижение детонационной стойкости на богатой смеси и повышение на бедной. Иначе говоря, на максимальных режимах детонация вероятнее при низкой температуре воздуха, а на крейсерских — при высокой.

Чтобы определить, какой бензин требуется для двигателя, детонационные характеристики снимают при наиболее жестких температурных условиях (как максимальных, так и минимальных t_k и t_d). Характеристики сравнивают с величинами потребного наддува при составах смеси, которые установлены техническими условиями на двигатель (заштрихованный прямоугольник на рис. 27). Если детонационная характеристика бензина проходит выше потребного наддува ($\bar{p}_k > p_{kt,y}$), то бензин по детонационной стойкости пригоден для данного двигателя, а если ниже ($\bar{p}_k < p_{kt,y}$), то непригоден [30, 80, 97].

ПОКАЗАТЕЛИ ДЕТОНАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Октановое число

Детонационная стойкость применяемого авиабензина должна быть не ниже тех норм, которые установлены путем испытаний бензина на авиационных двигателях. Для проверки этого про-бы, взятые от каждой партии бензина, испытываются на специаль-ных одноцилиндровых установках путем сравнения с эталон-ны ми топливами. Основным эталоном служит изооктан C_8H_{18} со-



водород с высокой детонационной стойкостью, условно принятой за 100. В качестве второго эталона применяется *нормальный гептан* C_7H_{16} , низкую детонационную стойкость которого условно принимают за нуль. Смешивая их в различных пропорциях, получают топливные эквиваленты от 0 до 100 — шкалу октановых чисел.

Состав эталонного топлива, равноценного испытуемому бензину, находят испытанием на установке ИТ9-2 при коэффициенте избытка воздуха, соответствующем максимальной интенсивности детонации ($\alpha = 1,0 \div 1,1$). Таким образом, октановое число бензина — показатель его детонационной стойкости на бедной смеси, равный процентному (по объему) содержанию изооктана в смеси с нормальным гептаном, которая по детонационной стойкости в стандартных условиях испытания равна данному бензину. Октановое число служит для контроля бензинов применительно к крейсерским режимам двигателей [30, 64, 97].

Сортность бензинов

На режимах полной мощности, когда двигатели в целях внутреннего охлаждения работают на богатой смеси ($\alpha \approx 0,6$) детонационная стойкость, как правило, совершенно иная, чем на бедной смеси. При этом почти у всех авиационных бензинов (содержащих антидетонатор) она выше 100, т. е. смеси изооктана с

гептаном как эталоны на богатой смеси непригодны. Этапоны выше 100 получают путем добавки к изооктану различных количеств антидетонатора — тетраэтилсвинца. Этапоны протарированы на одноцилиндровой установке (с цилиндром авиационного двигателя) при $\alpha=0,6$, и для каждого из них установлена сортность (рис. 28, сверху). Она показывает мощность в процентах, полученную при повышении наддува до начала детонации, по отношению к изооктану, не содержащему тетраэтилсвинца.

Сортность бензинов определяют на установке ИТ9-1: находят, какое эталонное топливо при $\alpha=0,6$ начинает детонировать при такой же мощности, как и испытуемый бензин. Сортность бензина принимается равной сортности этого эталона [30, 64, 97].

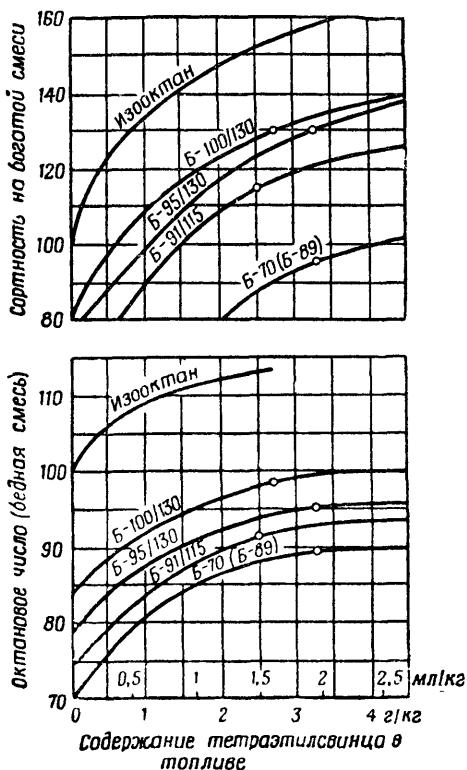


Рис. 28. Влияние ТЭС на повышение октановых чисел топлив (внизу) и сортности на богатой смеси (вверху)

ния в бензине мало повышает детонационную стойкость, но зато отрицательно влияет на надежность двигателя (в цилиндре увеличиваются отложения окислов свинца). На двигателях с большими сроками службы желательно применять бензины с меньшим содержанием ТЭС или еще лучше чистые бензины (если они имеют достаточную детонационную стойкость). ТЭС вводится в бензины в составе этиловой жидкости — смеси с вносителями (бром- и хлорпроизводными углеводородов). Реагируя с ними, свинец после сгорания превращается в летучие при высокой температуре соединения и в основном удаляется из камеры сгорания вместе с выхлопными газами [48, 81].

АНТИДЕТОНАТОР

Эффективность

Вводимый в бензины в качестве антидетонатора тетраэтилсвинец $Pb(C_2H_5)_4$, сокращенно ТЭС, представляет собой бесцветную, очень ядовитую жидкость. При $20^\circ C$ его плотность равна 1,652. При $200^\circ C$ он кипит и одновременно разлагается. Добавление первых малых количеств ТЭС (до 2,5—3,3 г/кг) весьма эффективно (рис. 28). Дальнейшее увеличение его содержа-

Ядовитость

Тетраэтилсвинец — сильный яд, действующий на нервную систему и кровь. Он способен накапливаться в организме, поэтому отравление им может быть обнаружено спустя длительное время. Попадание его в пищеварительный тракт может привести к смерти. Этилированными бензинами нельзя мыть руки и одежду: после испарения бензина на них остается тетраэтилсвинец, он способен проникать в организм через кожу [48, 72].

Стабильность

Добавляют ТЭС к бензинам при их производстве. При длительном хранении бензина тетраэтилсвинец постепенно окисляется, разлагается и вступает в реакции с продуктами окисления углеводородов. В результате образуется белый осадок (в сухом виде тонкая, едкая пыль, содержащая 50—60% свинца), который может нарушить нормальную работу топливной аппаратуры. Следует иметь в виду, что осадок этот ядовит. О разложении ТЭС свидетельствует помутнение бензина. Разложение ТЭС может также привести к возникновению детонации на двигателях. Для повышения стабильности растворенного в бензине ТЭС в авиабензины добавляется стабилизатор — *параоксидафениламин* в количестве 40—50 г/т, он тормозит окисление и разложение ТЭС [60, 66, 83].

СОРТА АВИАЦИОННЫХ БЕНЗИНОВ

Назначение и основные показатели

Стандартом предусмотрены авиабензины четырех основных сортов:

B-100/130 — ярко-оранжевого цвета, содержащий ТЭС до 2,7 г/кг, применявшийся на двигателях АШ-73ТК и используемый на некоторых иностранных двигателях;

B-95/130 — желтого цвета, содержащий ТЭС до 3,3 г/кг и предназначенный для двигателей АШ-82В и АШ-82Т;

B-91/115 — зеленого цвета, содержащий ТЭС до 2,5 г/кг и предназначенный для двигателей АШ-62ИР, АИ-26В.

В марках этих бензинов числитель дроби, например 91, указывает нижний предел октанового числа, а знаменатель, например 115, — нижний предел сортности на богатой смеси, допустимые для данного бензина.

B-70 — бесцветный, с октановым числом не ниже 70, не содержащий ТЭС и предназначенный для двигателей АИ-14Р и М-11 различных модификаций. Бензин *B-70* используется как пусковое топливо для некоторых типов газотурбинных двигателей и в качестве основного топлива специальных газотурбинных установок; использовать в них бензины, содержащие ТЭС, нельзя из-за отложений окислов свинца на лопатках турбин. Детонационная стойкость бензина для их работы значения не имеет.

Кроме того, ограниченное применение имеют еще два сорта бензинов:

БА — с особо высокой детонационной стойкостью (сортностью на бедной смеси не ниже 115 и на богатой смеси не ниже 160), содержащий ТЭС до 3,3 г/кг; применяется на некоторых двигателях иностранных марок;

СБ-78 — смесевой бензин с октановым числом не менее 78, содержащий ТЭС не более 0,66 г/кг и предназначенный для двигателей АИ-14ВФ. Его приготовляют смешением бензина Б-70 (75%) с бензином Б-91/115 (25%).

Бензин Б-70, как правило, вырабатывают путем прямой перегонки нефти. Более высокие сорта приготовляют путем смешения бензиновых фракций прямой перегонки и каталитического крекинга с высокооктановыми синтетическими компонентами (изопарафиновыми или ароматическими). В целях экономии их применяют только на тех типах двигателей, где они необходимы. Однако в случае отсутствия установленного сорта можно использовать более высокий, если только он содержит не больше (или несущественно больше) ТЭС, чем принято для данного типа двигателя [60, 66, 72, 96].

Общие свойства

В авиационных бензинах, как и в топливах для газотурбинных двигателей, ограничивается содержание веществ, способствующих повышенному образованию отложений, перегреву двигателей и коррозии (смол, непредельных углеводородов, органических кислот); не допускается наличие водорастворимых кислот и щелочей, воды, механических примесей. Специфичным для всех авиационных бензинов является жесткое ограничение общего содержания серы — не более 0,05%. Это связано с тем, что образующаяся из продуктов сгорания серная кислота (стр. 45) может попадать в масло и накапливаться в картере двигателя, что представляет опасность для нестойких против коррозии подшипников из свинцовистой бронзы.

Как и топлива для реактивных двигателей, авиационные бензины должны иметь низкую температуру начала кристаллизации (не выше —60° С). Чтобы предотвратить образование кристаллов льда, в авиационные бензины может добавляться та же антиобледенительная присадка, что и в топлива для реактивных двигателей (в том же количестве). Однако опасность кристаллообразования в бензинах меньше, чем в топливах типа керосина (несмотря на более высокий предел растворимости воды), так как в них кристаллы льда быстро оседают и удаляются с отстоем [60, 66].

Зарубежные марки

Спецификациями США, Англии, Франции и ряда других стран предусмотрены сорта авиабензинов 80/87, 91/96, 100/130 и 115/145 (маркировка по октановому числу и сортности на богатой смеси) с максимальным содержанием ТЭС до 2—2,5 г/кг, а также неэтилированный бензин с октановым числом 73 [72].

Г л а в а 5

РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

(по материалам зарубежной печати)

УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ И ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАКЕТНОМУ ТОПЛИВУ

Главные особенности

Современные ракетные двигатели работают на жидком или твердом химическом топливе¹ и соответственно делятся на две группы — жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) и ракетные двигатели твердого топлива (РДТТ). Жидкое ракетное топливо размещается в баках вне двигателя; для его подачи ЖРД оборудуются турбонасосным агрегатом (рис. 29) или газобаллонной (вытеснительной) системой. РДТТ не имеют системы подачи, пластическая или каучукообразная масса твердого топлива помещается непосредственно в камеру сгорания.

Ракетное топливо сгорает без потребления кислорода из внешней среды и служит единственным источником рабочего тела ракетного двигателя (масса отбрасываемого газа равна массе топлива). Содержание горючих элементов в ракетном топливе невелико, основную его долю составляет необходимый для их окисления кислород (или фтор). Поэтому выделение тепла в расчете на единицу веса бортового запаса ракетного топлива в несколько раз меньше, чем для топлив, окисляемых атмосферным кислородом. Однако стремление использовать композиции с наиболее высокой теплотворностью h_a не всегда оправдано из-за высокой температуры продуктов сгорания (выше 2500—3000° С), вызывающей термическую диссоциацию (распад) их молекул с поглощением тепловой энергии. Высокая температура объясняется тем, что каждый килограмм продуктов сгорания получает все тепло, выделяемое килограммом ракетного топлива (при сжигании обычного топлива в воздухе каждый килограмм газа получают не более 6% теплоты, выделяемой 1 кг топлива) [5, 6, 9, 38, 73, 86, 104].

Влияние на удельную тягу

Если бы диссоциации не было, то более высокая теплотворность обусловливалась бы соответственно больший прирост темпера-

¹ Ядерные топлива перспективных ракетных двигателей (в том числе электроракетных) кратко рассмотрены в конце гл. 5.

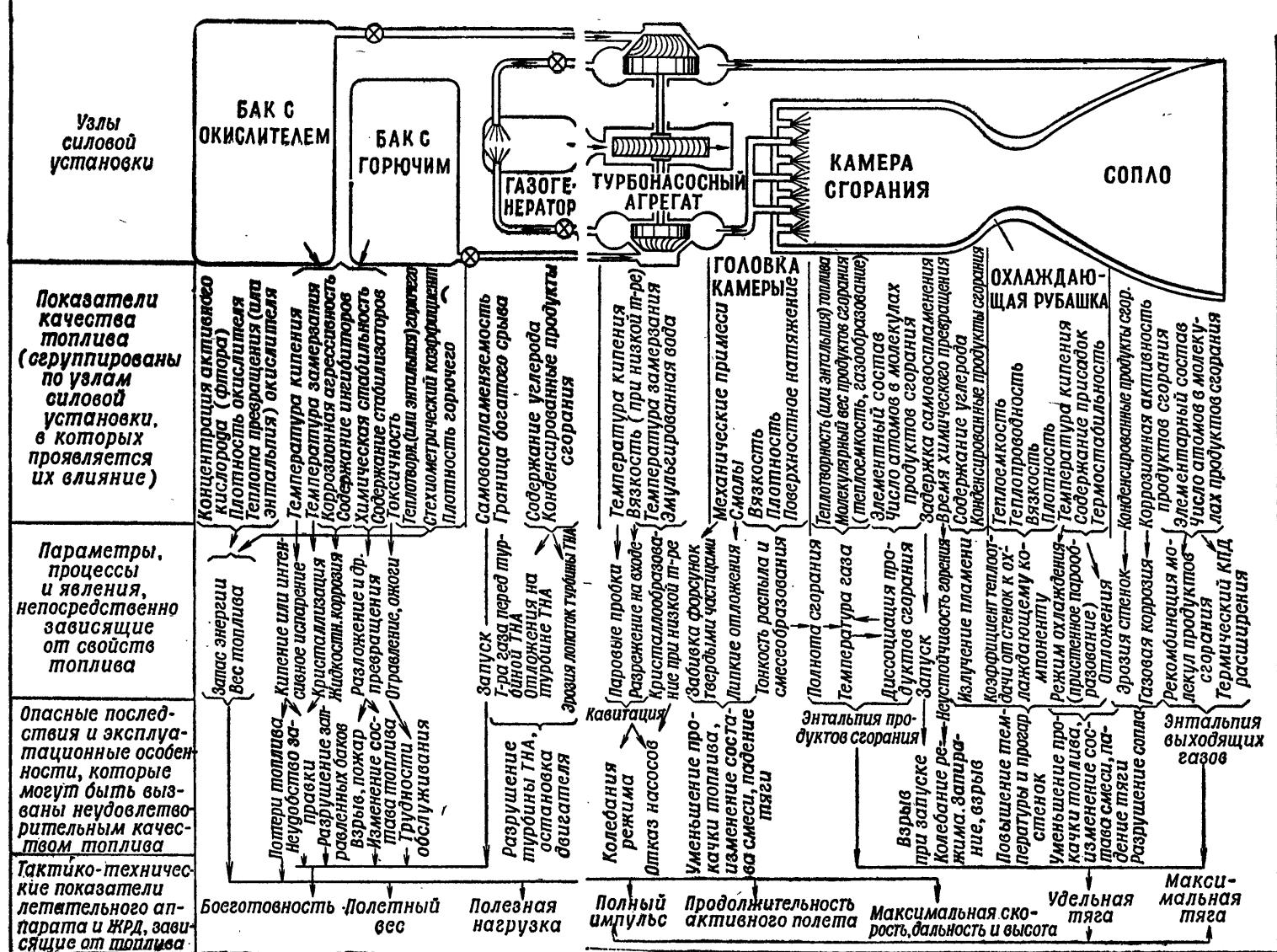


Рис. 29. Свойства жидкого ракетного топлива, влияющие на тактико-технические данные летательного аппарата, на надежность двигателя

туры газа при сгорании $\Delta T_z^* = \frac{h_a}{C_p}$ и более высокую удельную тягу:

$$P_{удид} = \frac{w_{c_{ид}}}{g} = 9,33 \sqrt{C_p T_z^* \eta_{t_z}}, \quad (5.1)$$

Формула (5.1) выражает идеальную удельную тягу, которая при расчетном режиме истечения без трения и потерь тепла зависит только от идеальной скорости истечения $w_{c_{ид}}$ (реальная скорость примерно на 5% меньше идеальной):

$$w_{c_{ид}} = \sqrt{\frac{2g}{A} C_p T_z^* \left(1 - \frac{1}{\frac{k-1}{\pi_c}}\right)} = 91,5 \sqrt{C_p T_z^* \eta_{t_z}}, \quad (5.2)$$

где C_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;

T_z^* — теоретическая (идеальная) температура газа после сгорания при отсутствии диссоциации, неполноты сгорания и теплоотдачи через стеки двигателя;

π_c — перепад давления газа в сопле ракетного двигателя;

k — показатель адиабаты процесса расширения газа в сопле;

$g = 9,81 \text{ м/сек}^2$ — ускорение силы тяжести;

$A = \frac{1}{427}$ ккал/кг — тепловой эквивалент механической энергии;

$$\eta_{t_z} = 1 - \frac{1}{\frac{k-1}{k}} \quad \text{термический к. п. д.}$$

Однако в действительности повышение температуры T_z^* приводит к усилению диссоциации. В результате газ перед входом в сопло обладает запасом химической энергии, не перешедшей в тепловую. Он тем больше, чем выше температура T_z^* . В процессе расширения в сопле газ охлаждается, диссоциированные осколки молекул соединяются и химическая энергия до конца переходит в тепловую, в результате чего температура газа T_c на выходе из сопла выше, чем при отсутствии диссоциации. Соответственно меньшим получается термический к. п. д.

$$\eta_{t_z} = \frac{C_p T_z^* - C_p T_c}{C_p T_z^*},$$

выражающий долю энталпии $C_p T_z^*$, превращаемую в кинетическую энергию (так как большая величина $C_p T_c$ — энталпия газа, выбрасываемого наружу); в конечном счете меньшей получается удельная тяга согласно уравнению (5.1). Это снижение к. п. д. иногда условно выражают уменьшением величины показателя адиабаты (до $k=1,1 \div 1,2$) в формуле (5.2). Следовательно, выгодны такие ракетные топлива, продукты сгорания которых имеют не слишком высокую температуру и благодаря этому менее склонны к диссоциации, а также содержат преимущественно двухатомные молекулы, стойкие против диссоциации [55, 73, 100].

Роль свойств продуктов сгорания

При равной теплотворности h_a температура газа T_z^* тем ниже, чем выше удельная теплоемкость $C_p = \frac{C_{pm}}{\mu}$, т. е. меньше молекулярная масса продуктов сгорания (по теплоемкости моля C_{pm} различие между газами гораздо меньше, чем по молекулярным массам). Повышение C_p или газовой постоянной $R = \frac{848}{\mu} [\text{кГм}/\text{кг}\cdot\text{град}]$ и газообразования топлива $v_t = \frac{22.4}{\mu} [\text{нм}^3/\text{кг}]$ не только компенсирует влияние понижения температуры на удельную тягу, но и обеспечивает прирост удельной тяги благодаря росту к. п. д.

Для получения низкомолекулярных (с малым μ) продуктов сгорания обычно используют топливо с недостатком окислителя $\alpha=0.7 \div 0.8$, а в случае кислородно-водородного топлива даже $\alpha=0.4$ (рис. 30), т. е. заведомо идут на неполное сгорание топлива и связанное с этим снижение его теплотворности h_a . Некоторое количество свободного водорода H_2 ($\mu=2$) вместо водяного пара H_2O ($\mu=18$), а также окиси углерода CO ($\mu=28$) вместо углекислого газа CO_2 ($\mu=44$) обеспечивает такой выигрыш в степени использования энергии (в к. п. д. η_{t_z}), который перекрывает это снижение. Молекулярная масса продуктов сгорания водорода ниже, чем углерода и других горючих элементов.

Таким образом, сама по себе высокая теплотворность и, тем более, высокая температура сгорания не свидетельствуют о высокой энергетической эффективности топлива в ракетном двигателе, так как они не отражают степени использования энергии топлива, зависящей от свойств самого топлива [5, 86]. Показателем, учитывающим ее влияние, является *удельная тяга (единичный импульс топлива)*. Следует иметь в виду, что показатель этот относительный, потому что он зависит не только от топлива. Для современных химических топлив скорость истечения газа из сопла ракетных двигателей порядка 2—4 км/сек, а удельная тяга соответственно порядка 200—400 кГ·сек/кг [55, 73, 86].

Роль плотности топлива

Наряду с удельной тягой решающее влияние на скорость, высоту и дальность полета ракетного летательного аппарата оказывает масса расходуемого ракетного топлива, точнее ее доля по отношению к массе летательного аппарата согласно формуле импульса силы тяги (1.12); она зависит от плотности топлива. Если весь импульс затрачивается только на разгон ракетного летательного аппарата, то максимальная скорость выражается *формулой Циolkовского*

$$v_{\max} = g P_{yd} \ln \frac{G_h}{G_k}. \quad (5.3)$$

Для установленного полезного груза $G_{\text{п}}$ при весе G_0 пустого ракетного аппарата, объеме топлива V_t и изменяемом в соответствии с плотностью топлива ρ_t начальном весе $G_{\text{н}} = G_0 + G_{\text{п}} + V_t \rho_t$

$$v_{\max} = g P_{\text{уд}} \ln \left(1 + \frac{V_t}{G_0 + G_{\text{п}}} \rho_t \right). \quad (5.4)$$

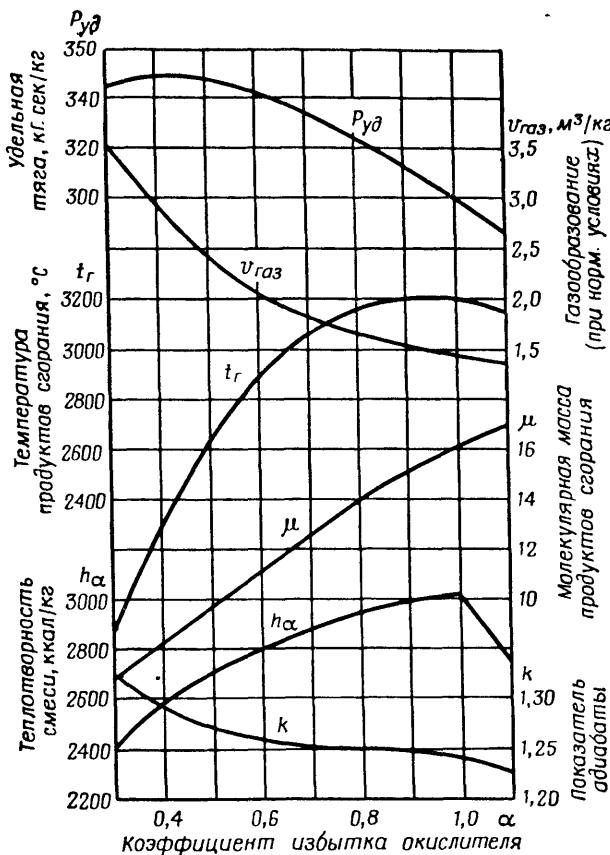


Рис. 30. Расчетные характеристики топлива жидккий кислород+жидкий водород по составу смеси (при $\rho_{\text{ж}} = 21 \text{ кг}/\text{см}^3$, $\pi_{\text{расш}} = 20,3$)

При этом эффект увеличения плотности топлива больше для малых $\frac{V_t}{G_0 + G_{\text{п}}}$, т. е. для летательного аппарата малой и средней дальности может оказаться выгодным более тяжелое топливо, даже если оно дает меньшую удельную тягу (например, твердое топливо или азотнокислотное топливо по сравнению с кислородным топливом). Летательные аппараты с большой относительной

емкостью топлива получают меньший процентный выигрыш в скорости из-за увеличения затрат импульса на разгон массы более тяжелого топлива.

Если установлен начальный вес, а полезный груз изменяется в соответствии с плотностью топлива $G_{\text{п}} = G_{\text{и}} - G_0 - V_{\text{трт}}$, то

$$v_{\max} = g P_{\text{уд}} \ln \frac{1}{1 - \frac{V_t}{G_i} \rho_t}. \quad (5.5)$$

При этом эффект увеличения плотности (рис. 6) больше для летательных аппаратов с большой дальностью полета (с большей топливной емкостью, отнесеной к единице начального полетного веса). Однако этот эффект дается ценой уменьшения полезного груза.

Одинаковый по весу бортовой запас топлива нуждается в емкости, обратно пропорциональной плотности топлива: $V' = V_t \frac{\rho_t}{\rho}$.

Различие в потребных емкостях ракетных летательных аппаратов практически весьма существенно, так как ракетные топлива различного состава могут резко (в несколько раз) различаться по плотности [55, 73, 86, 100].

Требования к ракетному топливу

Разнообразие химического состава ракетных топлив связано с тем, что одни из них дают преимущества применительно к одним задачам, другие — к другим. Это не позволяет в конкретной форме сформулировать единые требования для всех видов ракетных топлив (жидких и твердых, одно- и двухкомпонентных, высококипящих и криогенных и т. д.). Ко всем ракетным топливам обычно предъявляются лишь некоторые достаточно общие требования, главными из которых являются:

- высокая удельная тяга, достигаемая в результате оптимального сочетания высокой теплотворности топлива, низкой молекуллярной массы и малого числа атомов в молекулах продуктов сгорания;

- высокая плотность;

- не слишком высокая температура сгорания;

- нормальное протекание рабочего процесса (безопасное воспламенение при запуске, быстрое и полное химическое превращение, устойчивость процесса сгорания);

- обеспечение боеготовности (возможность содержания в заправленном состоянии, пригодность к использованию в широком диапазоне климатических и погодных условий).

Химическая активность ракетных топлив является причиной ряда нежелательных свойств — взрывоопасности, нестабильности (разложения), агрессивности в отношении материалов, токсичного действия на людей. Ракетные двигатели, как правило, рас-

считаны на несколько секунд или несколько минут работы, и вполне достаточно, если они в течение этого времени выдержат неблагоприятное воздействие ракетного топлива [9, 29, 38, 55, 78, 86].

ЖИДКИЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА РАЗДЕЛЬНОЙ ПОДАЧИ

Группы топлив

В ЖРД обычно применяется двухкомпонентное топливо. Его компоненты — горючее и окислитель — размещаются в раздельных баках и смешиваются только после подачи в камеру сгорания. Расход окислителя, как правило, в несколько раз больше расхода горючего. Свойства ракетного топлива определяются в большей мере окислителем, чем горючим. Поэтому топлива ЖРД делятся на группы в соответствии с входящими в их состав окислительными компонентами: *азотные* (окислителями являются азотная кислота и окислы азота), *кислородные* (на основе жидкого кислорода), *перекисноводородные*, *фторные* (на основе жидкого фтора и соединений фтора) [15, 73, 100].

Соотношение компонентов

Стехиометрическое соотношение между окислительным и горючим компонентом (соответствующее $\alpha=1$) зависит от элементного состава окислителя и горючего. Кислородсодержащих окислителей, представляющих собой «разбавленный» кислород, требуется больше, чем чистого кислорода в $1/[O]_{\text{акт}}$ раз, где $[O]_{\text{акт}}$ — вес активного кислорода, который отдает горючему 1 кг окислителя. Если в окислителе не содержится горючих элементов, то активным является весь содержащийся в нем кислород $[O]_{\text{ок}}=[O]_{\text{акт}}$. Если же в 1 кг окислителя содержится $[C]_{\text{ок}}$ кг углерода и $[H]_{\text{ок}}$ кг водорода, то часть кислорода останется связанный с ними и активного кислорода будет меньше:

$$[O]_{\text{акт}} = [O]_{\text{ок}} - 2,66 [C]_{\text{ок}} - 7,94 [H]_{\text{ок}}. \quad (5.6)$$

Окислителя, содержащего воду, нужно еще больше: вес активного кислорода в этом случае умножается на концентрацию окислителя $K < 1$.

В случае использования в качестве окислителя фтора F_2 в расчетах нужно исходить из того, что атомный вес фтора (19,00) в 1,19 раза больше, чем кислорода, и он одновалентен, т. е. для окисления горючего нужно в два раза больше атомов фтора F, чем двухвалентных атомов кислорода O. Следовательно, фтора требуется в $1,19 \cdot 2 = 2,38$ раза больше.

Соотношения между потребным количеством некоторых окислителей и потребным количеством кислорода, рассчитанные по формуле (5.6), приведены в табл. 8.

Таблица 8

ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПОТРЕБНОЕ КОЛИЧЕСТВО ЖИДКИХ ОКИСЛИТЕЛЕЙ ПО СРАВНЕНИЮ С КИСЛОРОДОМ

Окислитель	Молекулярная масса	Элементный состав, кг/кг		Отдача окислительных элементов в кг на 1 кг окислителя		Потребное количество по отношению к кислороду
		кислорода [O] _{ок}	водорода [H] _{ок}	кислорода [O] _{акт}	фтора [F] _{акт}	
Кислород (O_2)	32,00	1	—	1	—	1
Воздух (23,1 % O_2)	29,01	0,231	—	0,231	—	4,33
Азотная кислота (100 % HNO_3)	62,02	0,762	0,016	0,635	—	1,58
Азотная кислота (98 % HNO_3)	—	—	—	0,623	—	1,61
Азотный тетроксид (N_2O_4)	92,02	0,696	—	0,696	—	1,44
Перекись водорода (100% H_2O_2)	34,02	0,941	0,059	0,470	—	2,13
Перекись водорода (90% H_2O_2)	—	—	—	0,423	—	2,36
Перекись водорода (80% H_2O_2)	—	—	—	0,376	—	2,66
Фтор (F_2)	38,00	—	—	—	1	2,38
Дифторид кислорода (OF_2)	54,00	0,457	—	0,457	0,543	1,46

В случае горючего, не содержащего бора и металлов, и кислородсодержащего окислителя, стехиометрическое соотношение определяется формулой, вытекающей из выражений (1.2) и (5.6):

$$x_0 = \frac{2,66 [C]_r + 7,94 [H]_r - [O]_r}{[O]_{ok} - 2,66 [C]_{ok} - 7,94 [H]_{ok}},$$

где символы элементов в квадратных скобках обозначают их содержание соответственно в горючем компоненте (числитель) и в окислительном компоненте (знаменатель).

Пример. Двухкомпонентное топливо, состоящее из окислителя — азотной кислоты HNO_3 , содержащей $[O]_{ok}=0,762$ и $[H]_{ok}=0,016$, и горючего — диметилгидразина $(CH_3)_2N_2H_2$, который содержит $[C]_r=0,400$ и $[H]_r=0,133$, полностью сгорает при соотношении компонентов:

$$x_0 = \frac{2,66 \cdot 0,400 + 7,94 \cdot 0,133}{0,762 - 2,66 \cdot 0,016} = 3,34.$$

Решающее влияние на эту величину практически оказывает состав окислителя.

Действительное соотношение компонентов $x=\alpha x_0$, как правило, меньше стехиометрического [5, 86]: в камерах сгорания для получения максимальной удельной тяги топливо сжигается при $\alpha \approx 0,4 \div 0,8$; в газогенераторах топливоподавающих систем, работающих на основных компонентах топлива (рис. 29), с целью снижения температуры газа — при $\alpha \approx 0,1 \div 0,2$ [8, 55, 73].

Теплопроизводительность

Максимальное количество тепла, которое теоретически может выделить 1 кг ракетного топлива при полном протекании экзотермических реакций и охлаждении продуктов сгорания до исходной температуры, называется теплопроизводительностью. Теплопроизводительность двухкомпонентного топлива стехиометрического состава берется в расчете на единицу суммарного веса компонентов. Она зависит от теплотворности горючего H_g (при реакции с кислородом ракетного окислителя оно выделяет столько же тепла, сколько оно дает при сгорании в воздухе, см. табл. 2), от стехиометрического соотношения компонентов и теплового эффекта преобразования окислителя H_{ok} :

$$h_{p, t} = \frac{H_g + z_0 H_{ok}}{1 + z_0} \text{ [ккал/кг].} \quad (5.7)$$

Таблица 9

ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ И НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕЗВОДНЫХ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

(t , H_{ok} , ρ при 20°C , для криогенных компонентов —
при температуре кипения) [9,15]

Окислитель	Теплота образования при 20°C , ккал/кг	Полная энталпия t_{ok} , ккал/кг	Тепловой эффект H_{ok} , ккал/кг	Плотность ρ , кг/л	Temperatura, °C	
					кипения	замерзания
Жидкий кислород (O_2)	0	-96	-96	1,14	-183	-218
Жидкий озон (O_3)	+730	+630	+630	1,35	-112	-193
Азотная кислота (HNO_3)	-660	-660	-200	1,51	+84	-41
Азотный тетроксид (N_2O_4)	-50	-50	-50	1,45	+21	-11
Перекись водорода (H_2O_2)	-1315	-1315	+380	1,45	+150	-1
Жидкий фтор (F_2)	0	-80	-80	1,51	-188	-219
Дифторид кислорода (OF_2)	+140	+70	+70	1,52	-145	-223

Окислители в виде газообразных простых веществ (кислород O_2 , фтор F_2) имеют нулевую энталпию, но в жидким виде кислород ($t = -183^\circ\text{C}$) и фтор ($t = -188^\circ\text{C}$) имеют отрицательную энталпию и дают отрицательный тепловой эффект H_{ok} , так как на их испарение и нагрев затрачивается часть тепла, выделяемого при сгорании. Для сложных окислителей, так же как для горючих компонентов, тепловой эффект зависит не только от энталпии (теплоты разложения), но и от содержания в них горючих элементов и может быть подсчитан по формуле (1.5). Большинство сложных окислителей также дает отрицательный тепловой эффект H_{ok} .

Влияние теплового эффекта воды, содержащейся в окислителе (-600 ккал/кг), учитывается так же, как для горючих.

Пример. Определить теплопроизводительность ракетных топлив диметилгидразин+жидкий кислород и диметилгидразин+азотная кислота. Теплотвор-

ность диметилгидразина $H_r = 7140$ ккал/кг, тепловой эффект 1 кг окислителей для жидкого кислорода $H_{ок} = -96$ ккал/кг, для азотной кислоты $H_{ок} = -200$ ккал/кг (из табл. 1 и 9). Стехиометрический коэффициент диметилгидразина с кислородом $x_0 = 2,12$ (из табл. 7), с азотной кислотой $x_0 = 3,34$ (см. пример выше). По формуле (5.7) определяется для стехиометрической смеси диметилгидразина с кислородом

$$h_{р.т} = \frac{7140 + 2,12(-96)}{1 + 2,12} = 2220 \text{ ккал/кг}$$

и с азотной кислотой

$$h_{р.т} = \frac{7140 + 3,34(-200)}{1 + 3,34} = 1430 \text{ ккал/кг.}$$

Теплопроизводительность некоторых ракетных топлив приведена в табл. 10. Она существенно зависит от применяемого окислителя. От горючего она зависит в меньшей степени. Например, для топлива керосин + жидкий кислород величина $h_{р.т} = -2260$ ккал/кг всего лишь на 2% выше, чем для топлива диметилгидразин + жидкий кислород, тогда как теплотворность керосина на 45% выше по сравнению с диметилгидразином. При этом диметилгидразин обеспечивает более высокую удельную тягу за счет меньшего молекулярного веса продуктов сгорания. Действительная теплотворность ракетного топлива h_a при $a < 1$ меньше расчетной теплопроизводительности (см. рис. 4) [16, 73, 86, 97].

Расчетная плотность

Плотность (или удельный вес) двухкомпонентного ракетного топлива является условным, расчетным его параметром, так как окислитель и горючее хранятся и подаются в камеру сгорания раздельно. При действительном соотношении компонентов x это отношение суммы весов горючего и окислителя $1+x$ к сумме их объемов $V_r + V_{ок} = \frac{1}{\rho_r} + \frac{x}{\rho_{ок}}$:

$$\rho_{р.т} = \frac{1+x}{\frac{1}{\rho_r} + \frac{x}{\rho_{ок}}} \quad (5.8)$$

Для равномерного смешения горючего и окислителя желательно, чтобы их объемные расходы мало различались, т. е. отношение $\frac{x}{\rho_{ок}} : \frac{1}{\rho_r} = \frac{x\rho_r}{\rho_{ок}}$ было возможно ближе к единице; плотность окислителя по возможности должна быть больше, чем горючего [26, 86, 97].

Воспламенение

При контакте самовоспламеняющихся компонентов, впрыскиваемых в камеру сгорания, образуется горячий парогаз — смесь химически активных продуктов их разложения и паров. Развитие реакций в парогазе приводит к появлению очагов пламени, которое быстро охватывает всю массу накопившейся горючей смеси.

Таблица 10

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКИХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ [60, 86]

Состав топлива		При $\alpha = 1$			При оптимальном соотношении компонентов						
Окислитель	Горючее	Стехиометрическое соотношение, %	расчетная плотность $\rho_r, \text{ кг/л}$	теплопроводность $h_p, \text{ ккал/кв. м. град}$	коэффициент избытка окислителя α	расчетная плотность $\rho_r, \text{ кг/л}$	молекулярная масса продуктов сгорания $\mu, \text{ п. с.}$	температура горения $T, \text{ К}$	показатель процесса расширения k	удельная тяга $P_{\text{уд}} [\text{кг} \cdot \text{сек}/\text{кв}]$ при $p_K = 68 \text{ атмосфер}$	$F_c/F_{kp} = 40$, $p_H = 0$
Азотная кислота	Керосин ¹	5,36	1,34	1450	0,92	1,33	25,7	3147	1,22	263	312
	Тонка	4,67	1,33	1480	0,91	1,32	26,5	3120	1,23	267	315
	Гидразин	1,57	1,27	1420	0,96	1,25	20,9	3021	1,25	279	327
	Диметилгидразин	3,34	1,25	1430	0,90	1,22	23,6	3147	1,23	272	321
Азотный тетроксид	Керосин ¹	4,88	1,29	1790	0,83	1,29	25,5	3438	1,25	276	326
	Гидразин	1,44	1,23	1650	0,93	1,22	20,8	3247	1,26	291	342
	Диметилгидразин	3,05	1,21	1720	0,84	1,17	23,5	3415	1,25	285	337
	Аэрозин ²	2,24	1,23	1680	0,88	1,20	22,5	3300	1,25	287	339
Жидкий кислород	Керосин ¹	3,40	1,05	2260	0,74	1,07	23,7	3686	1,25	300	358
	Жидкий аммиак ¹	1,41	0,89	1630	0,96	0,88	19,0	3073	1,23	294	352
	Диметилгидразин ¹	2,12	1,00	2220	0,80	0,98	21,5	3608	1,25	310	368
	Жидкий п-водород ¹	7,94	0,43	2990	0,50	0,28	10,0	2977	1,26	391	456
Перекись водорода	Керосин	7,23	1,33	1585	0,96	1,34	22,0	3006	1,20	278	330
	Гидразин	2,13	1,27	1530	0,98	1,26	19,4	2927	1,22	287	338
	Диметилгидразин	4,51	1,26	1610	0,97	1,24	21,1	3008	1,21	284	336
	Пентаборан	6,45	1,23	2480	0,51	1,02	18,1	2969	1,21	309	373
Жидкий фтор	Жидкий аммиак	3,36	1,18	2300	0,94	1,17	19,0	4517	1,33	359	423
	Гидразин	2,38	1,32	2430	0,99	1,32	19,5	4727	1,33	364	429
	Пентаборан	7,20	1,29	3670	0,63	1,20	21,8	5080	1,30	361	431
	Жидкий п-водород	18,9	0,75	3090	0,43	0,47	12,1	3988	1,33	412	478

¹ Требуется принудительное воспламенение.² Смесь 50% гидразина и 50 % диметилгидразина.

При этом обычно резко нарастает давление, происходит взрыв («пушечный запуск»). Чем больше задержка самовоспламенения, тем выше пик давления. Считается, что во избежание разрушения двигателя задержка самовоспламенения должна быть не более 0,03 сек. При режимной работе ЖРД сокращение задержки химического превращения топлива повышает устойчивость горения, способствует уменьшению пульсаций давления. В случае применения несамовоспламеняющихся основных компонентов (кислородных топлив, азотной кислоты + керосин) для образования начального очага пламени иногда используются самовоспламеняющиеся пусковые компоненты [10, 29, 73, 100].

Охлаждающие свойства

Камеры сгорания и сопла ЖРД охлаждаются одним из компонентов или раздельно обоими компонентами топлива (не охлаждаются такие ЖРД, которые работают несколько секунд или в импульсном режиме). Отбор тепла от горячей стенки происходит при кипении тонкого слоя охладителя, непосредственно прилегающего к стенке. Образующиеся пузырьки пара конденсируются в потоке жидкости и передают ей тепло. Поэтому желательно, чтобы охлаждающий компонент имел высокую теплоту парообразования, теплопроводность и достаточную, но не слишком высокую температуру кипения (если она выше 250—300° С, то происходит перегрев камеры, опасный для ее прочности). Он не должен разлагаться при нагревании и выделять осадки внутри охлаждающей рубашки.

Количество тепла, которое может поглотить 1 кг компонента топлива (тепловосприимчивость компонента), определяется по формуле

$$q = C(t_k - t_{bx}), \quad (5.9)$$

где C — теплоемкость жидкости;

t_k — ее температура кипения или разложения;

t_{bx} — ее температура на входе в охлаждающую рубашку [10, 55, 90, 100].

ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ЖИДКИХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Азотные окислители

Азотная кислота HNO_3 — маловязкая относительно тяжелая жидкость. По содержанию активного кислорода (63,5%), а также по физическим свойствам (табл. 8) она является хорошим, удобным для применения окислителем и хорошим охладителем. Температура ее кипения под давлением, создаваемым в системе охлаждения топливными агрегатами, превышает 200° С, теплопроводность около 0,5 ккал/кг·град (выше большинства горючих), а подача в 3—4 раза больше, чем горючего. Основные ее недостатки — агрессивность по отношению к большинству материалов и токсичность. Не-

которые вводимые в азотную кислоту ингибиторы коррозии дают отложения внутри охлаждающей рубашки, а без ингибиторов отложения образуются из продуктов коррозии. Концентрированная азотная кислота гигроскопична, на воздухе «дымит» (ее пары образуют с влагой воздуха капельки тумана). Она химически нестойка, выделяет кислород и двуокись азота NO_2 , придающую кислоте желтый цвет. Возможность широкого применения азотной кислоты

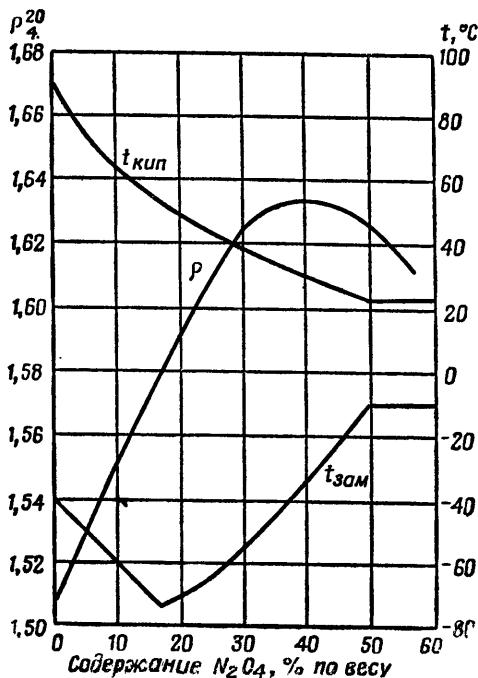


Рис. 31. Плотность, температура замерзания и кипения смесей азотной кислоты HNO_3 с азотным тетроксидом N_2O_4 (смеси, содержащие более 50% N_2O_4 , расслаиваются)

ратуру замерзания и меньшую плотность (табл. 8). Важное качество сухого азотного тетроксида — он не вызывает коррозии металлов. В емкостях с тетроксидом должна обеспечиваться герметичность во избежание попадания влаги и распространения вне его очень ядовитых паров [10, 15, 23, 56, 73, 86].

Жидкий кислород

Впервые жидкий кислород предложен в качестве окислительного компонента ракетного топлива К. Э. Циолковским еще при разработке им первых схем космических ракет в 1903 г. Высокие параметры кислородных топлив, простота и дешевизна производства жидкого кислорода обусловили его

в ракетной технике обеспечивается большими масштабами и дешевизной ее производства. Введение в азотную кислоту 15—30% азотного тетроксида и ингибиторов коррозии обеспечивает дальнейшее улучшение ее положительных качеств (в том числе физических свойств, см. рис. 31) и ослабление коррозионной активности и склонности к разложению.

Азотный тетроксид (четыреокись азота N_2O_4) содержит больше активного кислорода (69,6%), чем азотная кислота, а на его разложение при контакте с горючим требуется меньше тепла; и то и другое повышает теплопроводительность топлива. В чистом виде азотный тетроксид имеет худшие физические свойства, чем азотная кислота: более низкую температуру кипения, более высокую темпе-

применение на двигателях современных ракет-носителей космических объектов. Жидкий кислород O_2 — слабо-синего цвета, при атмосферном давлении имеет температуру кипения $-183^\circ C$. Под давлением он может иметь более высокую температуру (до $-119^\circ C$ при $49,7 \text{ кг}/\text{см}^2$ — критическая точка). Кристаллизация кислорода происходит при $-219^\circ C$, это позволяет переохлаждать кислород в целях уменьшения его потери при хранении, заправке и подготовке к пуску ракет, а также для увеличения веса заправки (переохлажденный кислород имеет более высокую плотность). Жидкий кислород не агрессивен в отношении материалов, но при свойственной ему (как и другим криогенным компонентам) низкой температуре многие материалы делаются хрупкими. Существенный недостаток жидкого кислорода — неэффективность его для охлаждения камеры двигателя [10, 15, 56, 104].

ГОРЮЧИЕ КОМПОНЕНТЫ ЖИДКИХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Углеводородные горючие

На вспомогательных самолетных ЖРД удобно применять обычные авиационные сорта углеводородных горючих с окислителем — перекисью водорода, обеспечивающей их самовоспламенение (американский ЖРД Рокитдайн AR2-3, английский ЖРД «Бристол-Сиддли» BS-605 и др.). На американском кислородном ЖРД «Рокитдайн» F-1 с тягой 680 тонн (пять таких двигателей устанавливаются на первой ступени ракеты «Сатурн-5») горючим компонентом является керосин марки RP-1, выкипающий в пределах 185 — $275^\circ C$, с малым содержанием ароматических углеводородов (не более 5%). Он отличается высокой полнотой сгорания и относительно низкой степенью черноты (излучения) пламени. Плотность этого керосина $0,795$ — $0,810$. С жидким кислородом углеводородные горючие не самовоспламеняются и нуждаются в специальном устройстве для зажигания [6, 56, 73, 90].

Азотсодержащие горючие

Преимущество азотсодержащих горючих по сравнению с углеводородными — самовоспламеняемость с азотными окислителями; они отличаются более высоким газообразованием (см. табл. 4), благодаря которому при более низкой температуре можно получить более высокую удельную тягу ЖРД. Практическое применение за рубежом нашли аммиак, его углеводородные производные — амины (главным образом ксилидин и триэтиламин), гидразин и его углеводородные производные — диметилгидразин и метилгидразин (см. табл. 3).

Аммиак — простейший гидрид азота NH_3 , при нормальных условиях является газом, но под давлением 6—7 атмосфер сохраняется в жидком состоянии при обычновенной температуре. На американском ЖРД Тиокол LR99-RM-1 экспериментального само-

лета Х-15 жидкий аммиак используется в сочетании с жидким кислородом; для его воспламенения применяется электрическое зажигание.

В качестве горючего компонента, хорошо самовоспламеняющегося с азотной кислотой, под названием тонка известна смесь 50% ксилидина и 50% триэтиламина (ее процентный состав близок к оптимальному, обеспечивающему минимум задержки самовоспламенения). Ксилидин (аминоксилол) $C_6H_3NH_2$ ($CH_3)_2$ — относительно тяжелая высококипящая маслянистая жидкость, триэтиламин $N(C_2H_5)_3$ — более легкая летучая жидкость. Как и большинство аминов, они обладают неприятным запахом и являются *смертельными ядами*. Триэтиламин по сравнению с другими аминами оказывает более резкое поражающее действие на центральную нервную систему. Плотность тонки около 0,85. Тонка впервые применялась на немецких ЖРД во время второй мировой войны.

Гидразин N_2H_4 — вязкая, относительно тяжелая ядовитая жидкость. Температура замерзания его с точки зрения эксплуатационной оценки не удовлетворительная ($+2^\circ C$), поэтому гидразин обычно используется в смеси с его низкозамерзающими углеводородными производными. Характерная особенность гидразина — малое потребное количество кислорода — килограмм на килограмм. В чистом виде гидразин применяется в качестве унитарного топлива. Несимметричный¹ диметилгидразин $(CH_3)_2N_2H_2$ (сокращенно НДМГ) является одним из важнейших горючих компонентов современной ракетной техники. В частности, он применяется на американских азотнокислотных двигателях Белл LR81-ВА-13 ракеты «Атлас-Агена» и др. НДМГ — прозрачная, бесцветная, по плотности близкая к керосину, маловязкая и весьма летучая жидкость с резким запахом и сильным отравляющим действием. НДМГ хорошо растворяется этиловым спиртом, бензином, керосином и водой; он гигроскопичен. Пары его взрывоопасны в широких пределах концентрации. Смесь 50% гидразина и 50% НДМГ под названием аэрозин служит горючим на целом ряде американских ЖРД (двигатели «Эроджет» всех трех ступеней ракеты «Титан-3С», посадочной ступени и взлета лунной кабины системы «Апполон» и др.). Окислителем в этих ЖРД является азотный тетроксид. По энергетическим и физическим свойствам аэрозин занимает промежуточное положение между двумя его составными частями. Метилгидразин $CH_3N_2H_3$ по ряду физических свойств лучше других горючих гидразинового ряда (см. табл. 3). Он используется в ЖРД системы маневрирования американского космического корабля «Саргейер» (окислитель — окислы азота) и опытном фторном ЖРД «Юнайтед Технологи» (в смеси с гидразином и водой) [6, 10, 15, 60, 73, 86].

¹ Несимметричность его молекул заключается в том, что к одному из атомов азота присоединены две метильные группы, а к другому — два атома водорода.

Жидкий водород

Как компонент ракетного топлива водород был предложен К. Э. Циолковским в первых его работах в 1903 г. Он резко отличается от всех остальных жидким горючих компонентов по физико-химическим свойствам (см. табл. 3): его температура кипения при атмосферном давлении всего на 20° выше абсолютного нуля, плотность в 10—15 раз, а вязкость в тысячи раз меньше, чем у обычных горючих при температуре их применения (0,00018 сантиметра, или 0,0025 сст). Водород обеспечивает высокие энергетические характеристики ракетного топлива (см. табл. 10) и хорошую организацию рабочего процесса: скорость его горения с кислородом и фтором очень высока, процесс горения устойчивый, тепловое излучение пламени ничтожно мало, нет нагара и отложений в камере сгорания и в системе охлаждения. Недогорание водорода не ухудшает, а улучшает параметры процесса (см. рис. 30). В связи с этим рабочий процесс специально рассчитывается на большой избыток водорода (вплоть до $\alpha=0,4$, т. е. несгорающего водорода падается в 1,5 раза больше, чем вступающего в реакцию с окислителем).

Из криогенных компонентов ракетного топлива жидкий водород является практически единственным, который может применяться для охлаждения камеры сгорания. Это объясняется высокой теплоемкостью и теплопроводностью газовой водородной прослойки, образующейся на пленочном режиме кипения у горячей стенки (прослойка других газов резко ухудшает теплоотдачу от стенки в жидкость). Водород обладает чрезвычайно высокой проникающей способностью и требует особых мер обеспечения герметичности сварных швов, соединений и даже сплошных листовых материалов. Уменьшение утечки и взрывоопасности может быть достигнуто применением двухфазного *твердо-жидкого водорода*. Водородная *шуга*, содержащая половину и более твердой фазы в виде частиц размером 1—5 мм, получается путем охлаждения жидкого водорода до температуры кристаллизации, которая на 7° ниже температуры кипения, за счет отвода теплоты испарения при длительной (несколько часов) откачке вакуум-насосом газа над жидкостью. Плотность жидкой фазы в шуге 0,0771 (почти на 10% выше, чем при температуре кипения), а плотность твердого водорода 0,0868 (на 22% выше).

Кислородно-водородное топливо требует принудительного воспламенения; одним из способов его осуществления является химическое зажигание. В качестве пускового горючего возможно применение trimетилалюминия $Al(CH_3)_3$ или триэтилалюминия $Al(C_2H_5)_3$, которые самовоспламеняются при контакте с кислородом (следует иметь в виду, что они самовоспламеняются и на воздухе); может быть также использован пусковой окислитель — трифтормицеллум хлора C_1F_3 , самовоспламеняющийся при контакте с водородом [5, 15, 54, 68, 73, 86, 109, 125, 134, 137, 140].

УНИТАРНЫЕ ЖИДКИЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

Общая характеристика

Унитарным (однокомпонентным) топливом могут быть такие жидкые вещества, разложение которых сопровождается выделением тепловой энергии и полной газификацией (табл. 11), а также стабильные растворы горючего в окислителе. Из-за опасности их детонационного взрыва практически используются вещества с низкими энергетическими характеристиками, применение которых в качестве топлив основных ЖРД ракет и самолетов считается нецелесообразным. Однако они могут быть выгодны в рулевых и других вспомогательных двигателях космических летательных аппаратов, работающих кратковременно или в импульсном режиме, так как позволяют создать простую и легкую систему топливопитания и обойтись без охлаждения камер сгорания. Кроме того, их применяют в качестве вспомогательных топлив, приводящих в действие турбонасосный агрегат основного ЖРД [55, 73, 86].

Таблица 11

ХАРАКТЕРИСТИКИ УНИТАРНЫХ ЖИДКИХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

Топливо	Химическая формула	Плотность при 20° С	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Теплота разложения, ккал/кг	Температура сгорания, °С	Удельная тяга (при $p_k = 68$ абсолютных атмосферах), кг·сек/кг
Перекись водорода (100 %)	H ₂ O ₂	1,448	-1	150	380	1000	165
Перекись водорода (87 %)	H ₂ O ₂	1,381	-13	142	250	660	126
Гидразин	N ₂ H ₄	1,008	+2	114	380	630	198
Нитрометан	CH ₃ NO ₂	1,137	-28	+101	-	2370	254
Окись этилена	C ₂ H ₄ O	0,869	-111	+11	600	1000	199

Перекись водорода

Разложение 100% перекиси H₂O₂ → H₂O + $\frac{1}{2}$ O₂ может произойти под действием случайных, неконтролируемых причин, поэтому обычно применяется перекись водорода 80—95% концентрации, содержащая стабилизатор. Влияние концентрации перекиси на ее физические и энергетические свойства показано на рис. 32. С водой она образует соединение H₂O₂ · 2H₂O (48,6% перекись водорода), замерзающее при -51° С; область концентраций 43—60% имеет характер эвтектических растворов. Составы с относительно высокой температурой замерзания склонны к переохлаждению на 20—30° С. Теплота, выделяемая при разложении перекиси в области ее полного превращения в парогаз (выше 62% концентрации), определяется из уравнения

$$H = [H_2O_2] \cdot 380 - [H_2O] \cdot 600 \text{ ккал/кг}, \quad (5.10)$$

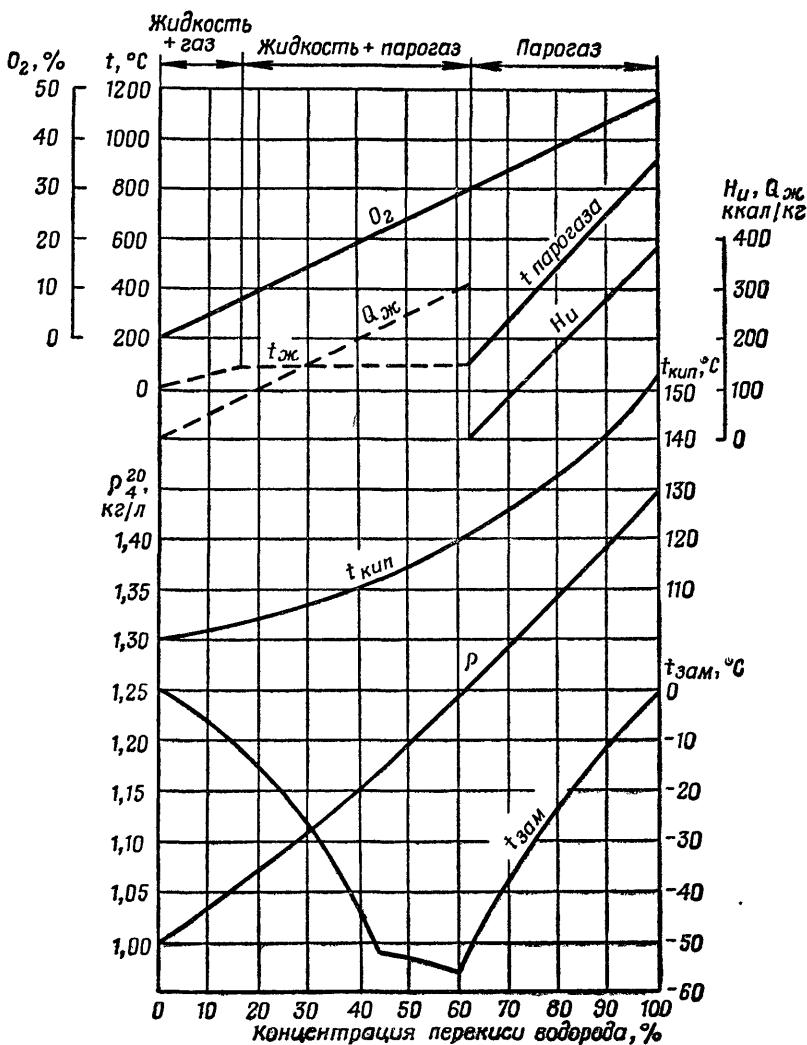


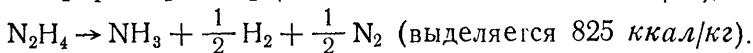
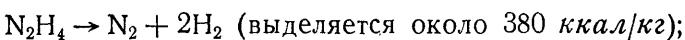
Рис. 32. Влияние концентрации перекиси водорода на ее физические свойства (плотность ρ_4^{20} , температуру кипения $t_{\text{кип}}$ и замерзания $t_{\text{зам}}$), на теплотворность H_u и температуру парогаза $t_{\text{парогаз}}$, на теплоту разложения $Q_{\text{ж}}$ и температуру $t_{\text{ж}}$ до полного превращения в парогаз, на количество выделяемого при разложении свободного кислорода O_2 ; вверху указано состояние после разложения

где в квадратных скобках — весовая доля соответствующего вещества. В парогазогенераторе ЖРД разложение перекиси водорода идет под действием твердых или жидкых катализаторов — серебряной сетки, раствора перманганата натрия, окислов металлов.

На американских ракетах «Редстоун» и «Юпитер» концентрированная перекись водорода является вспомогательным топливом для турбонасосных агрегатов. За рубежом разработаны различные перекисноводородные двигатели малых тяг, в том числе индивидуальный ранцевый двигатель для передвижения космонавта в открытом космосе. Концентрированная перекись содержит значительное количество активного кислорода, но в качестве окислителя основного ракетного топлива ее используют мало, так как она менее эффективна и более опасна в обращении, чем азотная кислота и жидкий кислород [15, 55, 73].

Особенности некоторых топлив

Гидразин может служить унитарным топливом, так как разлагается на водород, азот и аммиак с выделением тепла:



Вторая реакция протекает только при низких температурах; чем выше температура, тем больше аммиака разлагается на азот и водород. В качестве катализатора разложения применяют окись алюминия, пропитанную иридием. На гидразине работает ряд американских ЖРД с тягой от десятков граммов до сотен килограммов, предназначенных для управления и маневра космических объектов.

Нитрометан CH_3NO_2 и *пропиленитрат* $\text{C}_3\text{H}_7\text{ONO}_2$ содержат в составе молекулы химически непрореагировавшие друг с другом горючие элементы (С, Н) и окислительный элемент (O): они разделены барьером из азота. При разложении возникает процесс окисления, который обеспечивает большой тепловой эффект. Для устранения взрывоопасности и коксообразования в них вводятся присадки.

Окись этилена $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ разлагается с образованием смеси угарного газа CO, метана CH_4 , этилена C_2H_4 и водорода H_2 . Она доступна и недорога, поскольку ее широко используют в промышленности органического синтеза, и сравнительно безопасна в обращении [29, 86, 121].

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЩЕНИЯ С ЖИДКИМИ РАКЕТНЫМИ ТОПЛИВАМИ

Выбор материалов и меры против коррозии

Азотные окислители и концентрированная перекись водорода вызывают коррозию почти всех металлов и обугливают обычные прокладочные материалы, рукава и шланги из натуральных текстильных материалов и резины. Емкости для азотной кислоты и водорода обычно выполняются из чи-

стого алюминия, а различного назначения насосы и топливная аппаратура двигателя — из кислотостойкой высоколегированной хромоникелевой стали. При наличии ингибиторов коррозии, образующих защитную пленку из малорастворимых солей, они не разрушаются концентрированной кислотой. Действие нелетучего ингибитора, например фосфорной кислоты H_3PO_4 , считается эффективным в жидкой фазе, а летучего, в частности фтористого водорода HF , — в паровой фазе над уровнем топлива. Ингибитор HF разъедает стекло.

Разбавленная водой азотная кислота разрушает даже чистый алюминий, так как при разбавлении кислоты увеличивается степень диссоциации ее молекул и повышается интенсивность процессов электрохимической коррозии. При разбавлении водой перекиси водорода ее коррозионная активность уменьшается.

В качестве прокладочных и уплотнительных материалов и покрытий для азотной кислоты и перекиси водорода используются кислотостойкие пластмассы (например, полимеры фторпропиодных углеводородов) и асбест. Для шлангов и рукавов могут использоваться химически стойкие эластичные пластмассы типа полихлорвинала и др.

Гидразин, аммиак и их производные, обладающие щелочными свойствами, вызывают коррозию меди и медных сплавов. Поэтому эти сплавы обычно не применяют в аппаратуре, предназначенной для работы с этими горючими. Во избежание разрушения при воздействии аминов обычные прокладочные и текстильные материалы подвергаются специальной пропитке или же применяют стойкие к аминам пластмассы.

Криогенные компоненты в отношении коррозии металлов практически безопасны. Однако при температурах минус 150—250°С почти все стали, а также резина и многие пластмассы становятся хрупкими. Удовлетворительные механические свойства при этих температурах имеют алюминиевые и медные сплавы, хромоникелевые аустенитные стали; их и применяют для изготовления емкостей и аппаратуры для криогенных компонентов. Тепловой щитой служат вакуумированные рубашки, вакуумно-порошковая изоляция, пенопласти, шлаковая вата и др. Во избежание потерь и образования паровых пробок в топливных магистралях, а также тепловой деформации при заправке криогенными компонентами предварительно охлаждают всю топливную систему [67]. Заправка производится незадолго до запуска, чтобы не было внешнего обледенения летательного аппарата [6, 86, 90].

Взрывобезопасность и обеспечение стабильности

Взрывобезопасность ракетных топлив связана с их нестабильностью и загрязнением веществами, которые могут химически реагировать с компонентами или быть катализаторами их разложения. Наиболее взрывобезопасны унитарные топлива, в частности перекись водорода. Почти все вещества, кроме чистого алю-

миния, нержавеющей стали и некоторых пластмасс, способствуют ее разложению, которое развивается с саморазгоном и при достижении температуры 175°С заканчивается взрывом. Поэтому при работе с перекисью водорода применяют технические средства, выполненные из подходящих для нее материалов, и тщательно следят за чистотой как самой перекиси, так и поверхностей, соприкасающейся с ней. Поверхности подвергаются так называемой *пассивации* путем обработки веществами, образующими неактивную пленку. Сжатые газы, используемые при работе с перекисью водорода, фильтруются от пыли и других примесей. Начавшееся разложение перекиси водорода обнаруживается по усилившемуся выделению газа через дренаж и по повышению температуры перекиси выше температуры наружного воздуха. Для предотвращения взрыва перекись водорода обычно разбавляют значительным количеством воды, после чего она становится непригодной как топливо. Взрывоопасность некоторых унитарных топлив и окислителей, например нитрометана CH_3NO_2 , тетранитрометана $\text{C}(\text{NO}_2)_4$, озона O_3 , является основной причиной того, что они не находят практического применения.

Опасность взрыва появляется при попадании воды в азотнокислотный окислитель, так как при этом происходит выделение большого количества тепла и обильное парообразование. К взрыву может привести конденсация и кристаллизация в криогенных топливах таких химически активных веществ, накопление которых при определенной концентрации вызывает бурную реакцию: масла (из насосов) и ацетилена (из воздуха) в жидким кислороде, кислорода в жидким водороде и т. д. Самовоспламенение взрывного характера происходит при контакте кислорода с некоторыми органическими соединениями — жирами, маслами и др.; при работе с ним необходимо тщательное соблюдение чистоты тары и топливной аппаратуры.

Весьма взрывоопасным является гремучий газ $\text{H}_2 + \text{O}_2$ в случае накопления испарившегося водорода в смеси с воздухом. Однако пролитый в большом количестве и воспламенившийся водород горит с поверхности спокойно, без взрывов, причем пламя его вследствие большой скорости горения нечувствительно к ветру [26, 73, 90].

Сила взрыва ракетных топлив с высокими энергетическими характеристиками очень велика [122]. По экспериментальным данным диаметр мгновенно возникающего огненного шара при взрыве $d \approx 3,9 \sqrt[3]{G_t}$ [м], а продолжительность действия взрывной волны $\tau \approx 0,26 \sqrt[3]{G_t}$ [сек] (где G_t — вес топлива в кГ). Применительно к взрыву такой ракеты, как «Сатурн-V» это дает поперечник огненного шара около 400 м, а длительность действия взрыва около 30 сек.

Противопожарные меры

Большинство горючих, применяемых в ракетной технике, по огнеопасности существенно не отличается от бензинов и керосинов. Но емкости и заправочные средства с такими горючими, кото-

рые самовоспламеняются при контакте с азотными окислителями (диметилгидразин, тонка и др.), размещаются на значительном удалении от них. Азотные окислители и перекись водорода вызывают самовоспламенение древесины, тканей, сухих листьев, травы и т. д. Во избежание пожара площадки и полы помещений, где производится работа с этими окислителями, покрывают кислотоупорным бетоном (но не асфальтом), а кузова автомобилей снабжают металлическим кислотоупорным поддоном.

Вблизи емкостей с жидким кислородом воздух содержит больше газообразного кислорода, чем обычно, и поэтому больше пожарная опасность от любого внешнего источника пламени. Кислород адсорбируется хлопчатобумажными тканями, задерживается в волосах (в том числе на бровях и ресницах). После пребывания в атмосфере с повышенным содержанием кислорода нельзя курить и подходить к открытому огню.

Принципы и средства тушения горючих компонентов в ракетных топлив так же, как обычных нефтяных горючих: их тушат углекислотными пеноными огнетушителями или химическими огнегасительными жидкостями, но не водой. В противоположность этому для тушения пожара, вызванного жидкими окислителями, обычно применяется только вода: она разбавляет окислитель, снижает его активность и резко охлаждает очаг горения. Те огнегасительные средства, которые обычно применяются для тушения горючих, при этом бесполезны, так как их действие основано главным образом на изоляции очага горения от доступа кислорода воздуха, а при наличии азотной кислоты или перекиси водорода доступ воздуха для горения совершенно не требуется. Не могут помочь также обычные средства тушения малых очагов пламени — асбестовое одеяло, кошма и т. д. [73, 86, 90].

Токсичность

Многие ракетные топлива являются смертельными ядами или вызывают тяжелые поражения организма. Азотная кислота, окислы азота, концентрированная перекись водорода при попадании на кожу вызывают сильные ожоги. Особенно тяжелые, долго не заживающие поражения живых тканей вызывает азотная кислота. Газообразные окислы азота и пары азотной кислоты сильно раздражают дыхательные пути и легкие, разрушают роговицы глаз, зубы. Являясь ядом крови, они оказывают общее отравляющее действие на организм. Повышенная концентрация кислорода вызывает воспаление легких. Гидразин и НДМГ в основном являются ядом крови. НДМГ примерно вдвое токсичней, чем азотная кислота. Накапливаясь в организме, они разрушают легкие, печень, почки. Амины поражают центральную нервную систему и кровь. При тяжелых отравлениях аминами наступает потеря сознания, паралич и смерть. Непосредственное действие аминов на кожу незначительно, но они способны проникать через кожу внутрь

организма. Хроническое отравление ими приводит к кожному заболеванию.

Первыми признаками отравления во многих случаях являются головокружение, тошнота и рвота, сильный кашель, слабость, психическое возбуждение, синюха (посинение пальцев, губ, кончиков ушей). Признаки отравления не всегда появляются сразу, иногда они быстро исчезают, но через несколько часов отравление проявляется в полную силу [20, 73, 84, 86, 90].

ОСОБЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ КАЧЕСТВУ

Виды твердых топлив

По физико-химической природе твердые ракетные топлива делятся на две группы: *смесевые* (смеси горючих с окислителями) и *двухосновные* (колоидные системы из нитроцеллюлозы и нитроглицерина). По назначению твердые топлива можно разделить на рабочие топлива и вспомогательные составы; последние, как правило, по физико-химической природе относятся к группе смесевых топлив [55, 73, 91].

Скорость горения

Сгорание твердого ракетного топлива происходит с поверхности параллельными слоями. Фактически горит не само твердое вещество, а продукты его газификации: фронт пламени (светящаяся зона) устанавливается на расстоянии порядка десятой доли миллиметра от поверхности топливного заряда. Тепловой поток от пламени прогревает тонкий поверхностный слой топлива и возбуждает в нем реакции разложения, частичного окисления и другие, которые сопровождаются вспениванием, расплавлением, испарением, дымообразованием. Скорость смещения открытой поверхности твердого топлива по нормали (иначе говоря, толщина слоя топлива, выгорающего за секунду) называется *линейной скоростью горения* (w_g). Величина ее — от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров в секунду. Она зависит от химической активности топлива, от теплоотдачи пламени, а также от температуры, способной вызвать газификацию данного состава топлива (плавление и испарение или разложение): чем эта температура выше, тем ближе пламя к твердой поверхности и больше скорость горения. Имеет значение также микроструктура топлива: от размера зерен окислителя в смесевом топливе зависит поверхность контакта с горючим, по которой идут реакции в зоне прогрева (рис. 33, штриховые кривые), добавка катализаторов (солей, гидридов), замедлителей (например, парафина), красителей (обычно сажи, способствующей поглощению теплового излучения), тугоплавких металлов (вольфрама и др.).

Требуемая линейная скорость горения связана с конкретным назначением, размерами и конструкцией топливных зарядов. Для разгонных двигателей, кратковременно работающих ускорителей и пусковых зарядов нужны быстрогорящие топлива, а для маршевых двигателей и твердотопливных аккумуляторов давления желательны медленногорящие топлива [28, 55, 73, 86, 111].

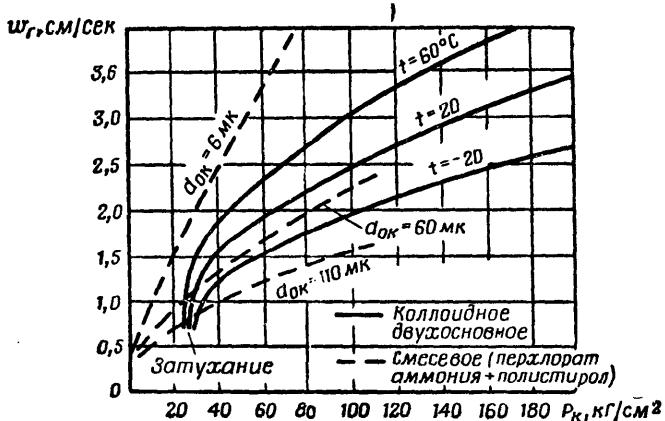


Рис. 33. Влияние температуры топлива и дисперсности составных частей на зависимость скорости горения w_r от давления в камере p_k для двух топлив

Чувствительность к давлению и температуре

Главное требование к твердому ракетному топливу, связанное с характеристиками его сгорания,— возможно меньшая зависимость скорости горения от давления в камере (p_k) и от исходной температуры топлива (t_t). Обычно их влияние выражают в виде зависимости, носящей название закона В'еля:

$$w_r = k_t p_k^n, \quad (5.11)$$

где показатель степени $n \approx 0,1 \div 0,8$ (его называют *показателем горения*), а величина k_t , характеризующая влияние температуры топлива на скорость горения, является функцией температурного коэффициента $\vartheta \approx 0,001 \div 0,007$:

$$k_t = k_{t_0} + \vartheta (t_t - t_0). \quad (5.12)$$

Меньшие значения $n \approx 0,1 \div 0,5$ и $\vartheta \approx 0,001 \div 0,003$ свойственны смесевым топливам, более высокие значения $n \approx 0,7 \div 0,8$ и $\vartheta \approx 0,005 \div 0,007$ — двухосновным топливам. Топлива, малочувствительные к давлению (с низким показателем горения n), обеспечивают лучшую устойчивость режима двигателя, меньшие колебания давления и тяги. Совершенно недопустимо $n \geq 1$ — топливо с таким показателем горения вызвало бы взрыв двигателя при любом случайному повышении давления или затухание заряда при понижении давления.

Чем выше исходная температура топлива, тем интенсивней его разложение, больше скорость горения, секундное газообразование и давление в камере сгорания. Повышение температуры топлива на 1°С вызывает увеличение давления примерно на 1,2% для двухосновных топлив и на 0,5% для смесевых. При использовании топлив, малочувствительных к температуре, проще обеспечить требуемый режим работы двигателя и меньший разброс при боевом применении ракет. При давлении в камере ниже 20—26 атмосфер разложение топлива замедляется, горение становится прерывистым (двигатель «чихает») или вообще прекращается. Чем ниже температура топлива, тем более высокое давление необходимо для запуска и устойчивого горения (см. участок затухания на рис. 33). Двухосновные топлива по этому показателю также хуже смесевых.

Слишком высокая химическая активность и высокая теплотворность твердого топлива могут создать условия для возникновения детонации при резком скачке давления и температуры, в том числе при сильном ударе, интенсивном электрическом разряде и т. п. Чтобы исключить ее возможность, состав высококалорийных топлив подбирается заведомо «богатым» ($\alpha < 1$) [5, 28, 55, 111].

Механические свойства

При хранении, перевозке, в полете геометрия заряда не должна изменяться, так как нерасчетное увеличение площади поверхности горения приводит в лучшем случае к изменению режима двигателя и программы полета, а в худшем — к взрыву или остановке двигателя. Поэтому твердое ракетное топливо должно обладать хорошими механическими свойствами — высокой прочностью, ударной вязкостью и эластичностью как при высоких, так и при низких температурах, чтобы высокое давление, импульсные перегрузки и термическая деформация не вызывали трещин и разрушения заряда. Топливо должно представлять не рыхлую, а сплошную массу, без пор и микроканалов, по которым горячие газы могли бы проникнуть внутрь и вызвать неуправляемые процессы разложения и горения. Топливо для крупных зарядов не должно быть склонно к ползучести или усадке, ему должна быть свойственна поверхностная сила сцепления (адгезия) с материалом корпуса камеры и негорючим покрытием (ингибитором), который профиширует рабочие участки заряда [5, 55, 86].

Значение плотности

Из числа требований, предъявляемых ко всем ракетным топливам, для твердых топлив особенно существенным является требование высокой плотности. Оно обусловлено тем, что по удельной тяге твердые топлива уступают жидким, а запас твердого топлива ограничивается объемом камеры сгорания

двигателя. Фактическая плотность твердых топлив может превышать расчетную плотность двухкомпонентных жидким топлив в 1,5—2 раза и более, что позволяет обеспечить не меньший импульс тяги, чем с жидким топливом [5, 73, 91].

СМЕСЕВЫЕ ТВЕРДЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

Общая характеристика

Смесевые ракетные топлива (их также называют *сложными* или *гетерогенными*) представляют собой механические смеси кристаллического окислителя (65—80%) с полимерным горючим (10—20%), которое одновременно выполняет функцию *связки*, скрепляющей массу мелких частиц окислителя и обеспечивающей твердому топливу необходимые механические свойства. Кроме того, они обычно содержат 5—15% металла, повышающего теплотворность, и до 10% присадок. По энергетическим свойствам, характеристикам горения, возможности формовать крупные заряды смесевые топлива лучше двухосновных (коллоидных) топлив. Эти качества обеспечивают смесевым топливам все возрастающую роль в ракетной технике [5, 55, 73, 91, 111].

Твердые окислители

Оксилителем в составе смесевых топлив служат кислородсодержащие соли хлорной и азотной кислоты — перхлораты аммония или калия, нитраты аммония, калия или натрия (табл. 12). Общее содержание кислорода в перхлоратах меньше, чем в соответствующих нитратах (64,3% в остатке хлорной кислоты ClO_4 и 77,4% в остатке азотной кислоты NO_3). Однако металл перхлоратов или часть водорода из группы NH_4 связывается хлором, что позволяет окислить больше горючего. Продукты разложения солей аммония газообразны, а из металлов содержащих перхлоратов и нитратов образуется некоторое количество твердых (дымовых) частиц хлоридов (NaCl , KC1) или окислов металлов (Na_2O_2 , K_2O_2 и др.), что уменьшает газообразование и удельную тягу. Излучение твердых частиц усиливает нагрев камеры сгорания и сопла, а их механическое действие вызывает эрозию стенок сопла. Но соли металлов имеют более высокую плотность.

По комплексу свойств одним из лучших окислителей в составе твердых топлив является *перхлорат аммония* NH_4ClO_4 . Он разлагается при относительно низкой температуре 200—450° С (без предварительного плавления), что обеспечивает топливам на его основе невысокую линейную скорость горения, наиболее выгодную в большинстве случаев. Благодаря наличию водорода он повышает теплотворность топлива, а в продуктах его разложения значительную часть составляют водяной пар и азот, отличающиеся сравнительно высоким удельным объемом (газообразованием). Поэтому топливам на основе

Таблица 12

СОСТАВ И НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ОКИСЛИТЕЛЕЙ [86]

Окислители	Молекулярная масса	Элементный состав, кг/кг		Содержание активного кислорода [O] _{акт}	Потребное количество по отношению к кислороду	Полная энталпия <i>i</i> _{ок} , ккал/кг	Тепловой эффект <i>H</i> _{ок} , ккал/кг	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °C
		Кислород [O] _{ок}	Водород [H] _{ок} металл: [Me] _{ок}						
<i>Перхлораты:</i>									
NH_4ClO_4	117,50	0,546	0,251 ¹	0,343	2,92	-600	+340	1,95	270 ³
KClO_4	138,56	0,462	0,282	0,462	2,17	-740	-150	2,53	525
LiClO_4	106,40	0,602	0,065	0,602	1,66	-860	+240	2,43	247
<i>Нитраты:</i>									
NH_4NO_3	80,50	0,599	0,050	0,202	4,95	-1090	-320	1,73	170
KNO_3	101,11	0,474	0,387	0,316 ²	3,16	-1165	-750	2,11	333
NaNO_3	85,01	0,565	0,258	0,376 ²	2,79	-1310	-700	2,26	310

¹Не связываемый хлором.²Не связываемый металлом.³Температура разложения.

перхлората аммония, несмотря на невысокое содержание активного кислорода, свойственны хорошие энергетические показатели. Перхлорат аммония обладает малой гигроскопичностью. Отрицательные его качества — недостаточная стабильность, склонность к детонации при высоких давлениях и температурах, а также образование тумана соляной кислоты при истечении продуктов сгорания во влажную атмосферу. *Перхлорат калия* KClO_4 , несмотря на большое содержание активного кислорода, дает на 15—20% меньшую удельную тягу из-за затраты тепла на разложение и из-за образования твердых частиц KCl . С ним легче получить хорошие механические свойства заряда, так как можно ввести в топливо больше горючего-связки. Исследуется *перхлорат лития* LiClO_4 , который дает на окисление горючего еще больше кислорода, стабилен, безопасен в обращении.

Нитраты — аммиачная, натриевая и калийная селитры — дешевые доступные окислители (они широко применяются в сельском хозяйстве как удобрение). Однако они менее эффективны, чем перхлораты, и гигроскопичны, что отражается на механических свойствах топлива. Серьезным недостатком нитрата аммония является изменение его кристаллической структуры с изменением температуры, которое сопровождается изменением объема и образованием трещин в заряде [25, 29, 73, 86].

Горючие-связующие

Горючим и одновременно связующим веществом в составе смесевых твердых топлив являются различные синтетические полимеры типа каучука, смол, пластмасс (табл. 1 и 3). Наибольшее применение из них находит *полиуретан* ($\text{NH} \cdot \text{COO} \cdot \text{C}_n\text{H}_m)_x$ — каучукообразный полимер со сравнительно невысокими энергетическими характеристиками, но с хорошими механическими свойствами, в том числе морозоустойчивостью и адгезией, обеспечивающей прочное соединение заряда со стенкой камеры сгорания. При длительном хранении, однако, происходит постепенное ухудшение его механических свойств. *Бутадиеновый каучук* (C_4H_6)_x и *бутадиен-стирольный каучук* ($\text{C}_4\text{H}_6 \cdot \text{C}_6\text{H}_3 \cdot \text{C}_6\text{H}_5$)_x имеют лучшие энергетические свойства, чем полиуретан, но из-за высокого стехиометрического коэффициента их не вводят в таком количестве, которое обеспечивает требуемые механические свойства топлива. *Полисульфидный каучук* ($\text{C}_2\text{H}_4 - \text{O} - \text{C}_2\text{H}_4 - \text{S}_4$)_x или *тиокол*, содержащий значительное количество балластной серы, имеет худшие энергетические свойства, но зато низкий стехиометрический коэффициент. Это позволяет вводить его в состав смесевого топлива в большом количестве. Обеспечивая хорошие механические свойства топлива при положительных температурах, он становится хрупким при отрицательных (-15°C). Очень прочные, но мало эластичные, хрупкие при низких температурах заряды получаются в случае применения в качестве связующего горючего *эпоксидной* или *фенолформальдегидной смолы*. Особым видом горючего-связки является нитрозол (желатинизированная нитроцеллюлоза), который содержит значительное количество активного кислорода (соответствующее $\alpha \approx 0,6$). Для его сгорания требуется меньше окислителя, чем для бескислородных горючих. Тем самым облегчается получение требуемых механических свойств заряда [73, 86, 91, 111].

Добавка металлов

Повышение энергетических показателей смесевого топлива достигается добавкой алюминия или других металлов. Для их сгорания требуется мало окислителя, благодаря чему на единицу веса они дают в 2—2,5 раза больше тепла, чем полимеры. Последние же из-за введения металлов лишаются небольшой доли окислителя. Тепло, выделяемое при горении металлов, передается газообразным продуктам сгорания основной массы топлива, повышая температуру газа и удельную тягу двигателя. Сами же продукты сгорания металлов образуются в виде конденсированных частиц (дым, а не газ), что приводит к потерям удельной тяги. Существует некоторое оптимальное содержание металлов в топливе (порядка 10—20%), обеспечивающее максимум удельной тяги; но его трудно достигнуть, потому что металл, как и окислитель, нуждается в связующем веществе. Чем больше

полимерного горючего-связки в составе топлива, тем больше можно ввести в него металлического горючего при сохранении удовлетворительных механических свойств топлива. В связи с этим смесе-

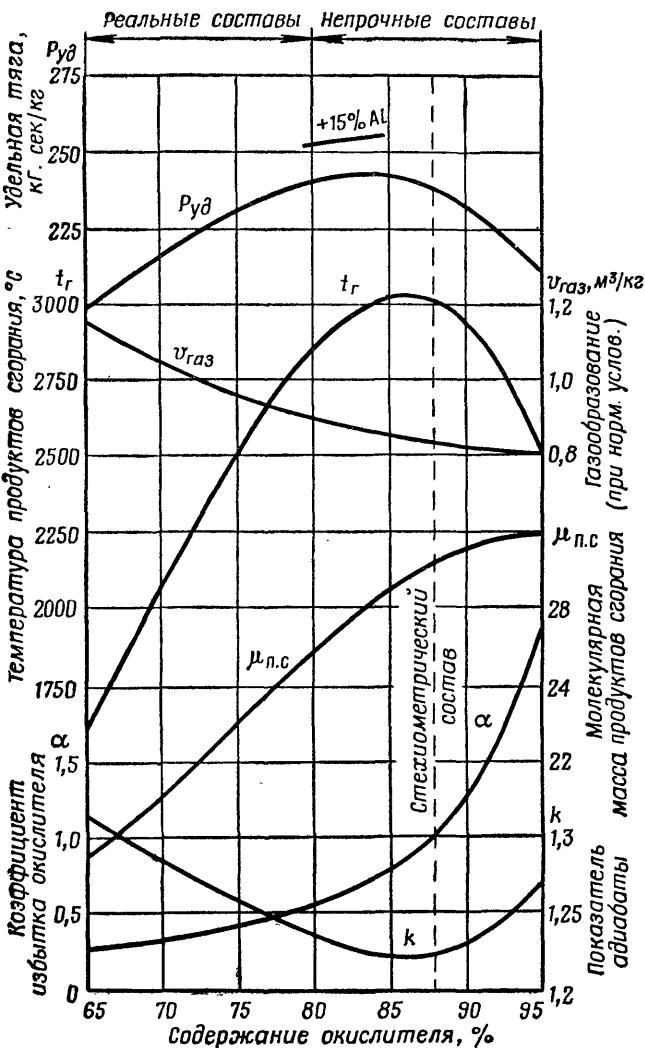


Рис. 34. Расчетные характеристики смесевого твердого топлива (перхлорат аммония + полизефир) различного состава ($p_k = 70 \text{ кГ/см}^2$); сверху показано влияние добавки алюминия на удельную тягу

вые топлива, как правило, сильно обогащены горючим, примерно до $\alpha = 0,5 \div 0,6$ (рис. 34). Некоторые свойства металлов как горючих приведены в табл. 13.

Таблица 13

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ГОРИЮЧИХ И БОРА [29,86]**

Наименование показателей	Алюминий	Бериллий	Литий	Магний	Бор
Теплотворность горючего, ккал/кг	7400	15 900	10 300	5930	14 000
Стехиометрический коэффициент по кислороду (потребное количество кислорода), кг/кг	0,89	1,78	1,15	0,66	2,22
Теплотворность стехиометрической смеси с кислородом, ккал/кг	3920	5720	4780	3590	4330
Плотность металла, г/см ³	2,70	1,85	0,534	1,74	2,30
Энергоемкость металла, ккал/л	20 000	29 400	5500	10 300	32 200
Температура плавления металла, °С	660	1284	180	651	2027
Температура кипения металла, °С	2467	2484	1347	1108	3677
Состав окиси металла	Al ₂ O ₃	BeO	Li ₂ O	MgO	B ₂ O ₃
Температура плавления окисла, °С	2050	2550	1430	2800	450
Температура кипения окисла, °С	2700	3900	1700	3600	2225
Теплота конденсации окисла, ккал/кг	3300	18 000	7400	6100	4800

Чаще всего металл вводится в состав топлива в виде высокодисперсного порошка (1—2 мк). Для повышения прочности заряда могут быть применены армирующие структурные элементы из металла — тонкая проволока, сетка, волокно, фольга (в том числе сотовый каркас из фольги). Полнота сгорания металла в этом случае хуже.

Большие природные запасы и крупные масштабы мирового производства алюминия позволяют использовать его в качестве горючего в большей мере, чем любой другой металл. По теплотворности он уступает бериллию и литию; в какой-то мере это компенсируется более высокой плотностью. Алюминиевая пудра повышает стабильность горения топлива. Для защиты от окисления ее частицы пассивируют в процессе получения (например, конденсационной пленкой органических соединений). Бериллий — редкий и сравнительно дорогой металл; по теплоте сгорания занимает второе место (после водорода) среди всех химических элементов, при введении в топливо является катализатором отверждения полимерного горючего. Магний легче алюминия и бериллия, теплотворность его невелика, но благодаря малому стехиометрическому коэффициенту он выделяет больше тепла на единицу веса кислорода, чем любое другое горючее. Магний повышает скорость горения топлива. Природные мировые ресурсы и масштабы его производства достаточно велики. Литий лучше алюминия и магния по количеству тепла, выделяемого на единицу веса смеси с окислителем, но по объемной теплотворности из-за малой плотности значительно хуже не только металлических, но и полимерных горючих. Природные запасы лития значительны, масштабы же мирового производства пока невелики.

Наряду с металлами добавляется также бор — аморфное или кристалличес-

ское вещество темно-бурого или черного цвета с высокой теплотворностью. В отличие от рассмотренных выше металлов он нуждается в относительно большом количестве окислителя, что затрудняет его использование в составе твердых топлив. Лучшими свойствами, в том числе большей полнотой горения, обладает твердый гидрид бора $B_{10}H_{14}$. Теплотворность его (высшая по бору) 15 600 ккал/кг, плотность 0,92, температура плавления 219° С. Недостаток его — гигроскопичность [5, 73, 86, 111].

Пусковое топливо

В качестве воспламеняющих составов применяются смесевые топлива, дающие большое количество дымных продуктов горения: перхлорат калия с магниевым или алюминиевым порошком, а также дымный (черный) порох — смесь нитрата калия, древесного угля и серы. Излучение дымных частиц обеспечивает быстрый подогрев поверхности рабочего твердого топлива при запуске РДТТ. Порох обладает худшей излучательной способностью, но не окисляется при хранении и поэтому более надежен [24].

ДВУХОСНОВНЫЕ (КОЛЛОИДНЫЕ) ТВЕРДЫЕ РАКЕТНЫЕ ТОПЛИВА

Физико-химическая природа

Двухосновные или коллоидные твердые топлива (их также называют *гомогенными* топливами и *баллиститными порохами*) имеют две характерные особенности. Во-первых, они имеют коллоидную микроструктуру, двумя основами которой являются твердая, но рыхлая в исходном состоянии *нитроцеллюлоза* и растворитель — *нитроглицерин* (иногда динитротолуол и др.), который связывает ее в сплошную твердую массу. Во-вторых, их молекулы содержат одновременно и горючую углеводородную часть и готовый к взаимодействию с ней кислород, отделенный от горючих элементов «барьером» из атомов азота (группы NO_2). При нагревании или ударе «барьер» разрушается, атомы азота соединяются в газовые молекулы N_2 , а освободившиеся атомы кислорода бурно реагируют с атомами горючих элементов — водорода и углерода: происходит сгорание. Микро-неоднородность коллоидной структуры топлива при этом препятствует взрыву, склонность к которому проявляет каждая из исходных его составных частей в отдельности. Чистая нитроцеллюлоза взрывается из-за огромной поверхности рыхлого пористого вещества, по которой распространяется горение, а нитроглицерин детонирует при ударе [25, 73, 91, 103, 111].

Нитроцеллюлоза

Азотнокислые эфиры, получаемые путем обработки азотной кислотой целлюлозы (ваты, хлопкового пуха или волокнистой древесной клетчатки), представляют собой полимерные цепи из нескольких сотен или тысяч звеньев $C_7H_6O_2(OH)_n(ON_2)_{3-n}$, где $n \leq 3$. В звеньях полимерной цепи число групп ONO_2 может

быть неодинаковым, поэтому степень нитрации целлюлозы характеризуют не химической формулой, а содержанием азота. Для нитроцеллюлозы, идущей на приготовление ракетных топлив, оно составляет 12—13%; при этом содержание активного кислорода в 2,86 раза больше содержания азота.

В нитроцеллюлозе недостаточно кислорода для превращения всего углерода и водорода в конечные продукты окисления ($\alpha < 1$). Чем выше степень нитрации, тем больше их окисляется и выше теплотворность топлива. Однако повышение степени нитрации ухудшает растворимость нитроцеллюлозы в нитроглицерине и увеличивает ее гигроскопичность (количество поглощенной влаги из воздуха может достигать 2%) [23, 24, 33, 73, 111].

Нитроглицерин

В чистом виде нитроглицерин $C_3H_5(ONO_2)_3$ — густая маслообразная жидкость, бесцветная или слабо-желтая, одно из сильнейших и опаснейших взрывчатых веществ. Его теплотворность примерно в 1,5 раза больше, чем у нитроцеллюлозы. В нитроглицерине содержится избыток кислорода ($\alpha = 1,06$), при сгорании двухосновного топлива он идет на окисление горючих элементов нитроцеллюлозы. Стехиометрический состав двухосновного топлива ($\alpha = 1$) — 89,5% нитроглицерина и 10,5% нитроцеллюлозы, максимум же удельной тяги из-за диссоциации газов получается при 50% нитроглицерина. Но по прочности и стабильности топливо, содержащее более 43,5% нитроглицерина, непригодно: оно расплаивается с выделением жидкого нитроглицерина [23, 24, 86].

Присадки

В двухосновное топливо вводится до 10% присадок: централит (диэтилдифенилкарбамид) $CO(N \cdot C_6H_5 \cdot C_2H_5)_2$ и дифениламин $NH(C_6H_5)_2$ для стабилизации топлива, масло или вазелин для облегчения прессования, сажа против прогрева заряда излучением, диэтилфталат для защиты от увлажнения и др.

Технология приготовления двухосновных твердых топливных зарядов хорошо отработана, что является одной из причин их применения, несмотря на худшие энергетические показатели, чем у смесевых топлив. Для повышения энергетических свойств двухосновных топлив в их состав иногда вводится алюминиевый порошок и твердый окислитель, например перхлорат аммония. Такие топлива по существу являются «гибридными» между двухосновными и смесевыми [24, 55, 91, 111].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТЯГИ

Перспективные окислители

Фтор и некоторые его соединения (см. табл. 8 и 9) — наиболее энергичные окислители (во фторе горят вода, асбест, песок; с три-

фторидом и пентафторидом хлора вода взрывается). При окислении фтором горючие выделяют значительно больше тепла, чем при окислении кислородом (см. табл. 2 и 3), металлы образуют более летучие продукты сгорания, но затраты фтора на окисление в 2,38 раза больше, чем кислорода. Продукт сгорания водорода во фторе HF имеет хорошие термодинамические свойства, углерод же со фтором менее эффективен — пятиатомные молекулы CF_4 легко диссоциируют, отнимая часть выделенного при сгорании тепла. Со фтором самовоспламеняются все ракетные горючие.

Ниже -188°C при атмосферном давлении фтор F_2 — ярко-желтая жидкость. Хранят его в герметичных емкостях, омываемых жидким азотом (при -196°C). Он не разрушает никеля, нержавеющей стали, алюминия, меди и ее сплавов, образуя на их поверхности защитную пленку (пленка хрупкая и растрескивается в местах изгибов). Фтор чрезвычайно ядовит. Жидкий дифторид кислорода OF_2 имеет более высокую температуру кипения (-145°C), что облегчает его хранение. Он еще токсичней, чем фтор. Перспективным окислителем рассматривается смесь жидкого фтора и жидкого кислорода (так называемый *флокс* — от первых букв латинских наименований фтора и кислорода).

Считается возможным повышение эффективности кислородного окислителя путем добавки к жидкому кислороду до 25% жидкого озона O_3 (см. табл. 9) — аллотропного видоизменения кислорода (больше озона в нем не растворяется). Чистый озон чрезвычайно взрывоопасен и не может быть использован. Озон активней кислорода, при контакте с ним горючие самовоспламеняются. Превращаясь в кислород O_2 , озон выделяет дополнительную тепловую энергию. При температуре кипения жидкого кислорода (-183°C) плотность озона 1,57. Озон ядовит [86, 133, 135].

Максимальные показатели двухкомпонентных топлив

Наибольшую теплопроизводительность (около 5700 ккал/кг) имеют топлива литий — фтор и бериллий — кислород (те же элементы в сочетании бериллий — фтор и литий — кислород дают около 4800 ккал/кг). Любые другие сочетания элементов дают значительно меньше тепла в расчете на 1 кг стехиометрической смеси (в частности, водород — кислород 2990 ккал/кг, водород — фтор 3090 ккал/кг). Однако по удельной тяге бериллий — кислород и литий — фтор хуже, чем водород с кислородом и фтором, из-за конденсации окислов металлов в процессе расширения.

Самыми лучшими топливами по газообразованию являются водород — кислород (1243 нл/кг) и водород — фтор (1119 нл/кг), причем газообразование их резко увеличивается при неполном сгорании водорода из-за очень большого его удельного объема — 11 120 нл/кг, что в 9—10 раз больше объема продуктов его полного сгорания. Вследствие этого максимум удельной тяги этих топлив получается тогда, когда примерно половина водорода не сгорает. Стойкость двухатомного HF к диссоциации, а также его показатель адиабаты расширения выше, чем трех-

атомного H_2O , что обеспечивает более высокий термический к. п. д. двигателя. Поэтому удельная тяга на водород-фторном топливе существенно выше, чем на водород-кислородном [55, 73, 128, 133].

Трехкомпонентные композиции

Наивысшие значения теоретической удельной тяги [$\text{kГ}\cdot\text{сек}/\text{кг}$] соответствуют трехкомпонентным топливам, сочетающим максимальную теплопроизводительность комбинаций бериллий — кислород и литий — фтор с максимальным газообразованием, которое обеспечивается водородом (данные приводятся для истечения в вакуум):

Водород — кислород	439	Водород — фтор	469
Бериллий — кислород	328	Литий — фтор	456
Бериллий — водород — кислород	564	Литий — водород — фтор ¹ 520

Вместо лития может быть взят гидрид лития LiH (его теплотворность около 12500 $\text{ккал}/\text{кг}$); удельная тяга в этом случае несколько меньше — 509 $\text{кг}\cdot\text{сек}/\text{кг}$. Соотношение компонентов должно быть таким, чтобы металлы сгорали полностью, а водород оставался в основном свободным. Предполагается, что бериллий может поступать в камеру сгорания двигателя в виде порошка, литий — в расплавленном состоянии (он плавится при 180°C), а гидрид лития может помещаться в камеру сгорания гибридного двигателя в виде блоков (его температура плавления 680°C) [117, 128, 133, 139, 140].

Бораны

Перспективными горючими компонентами считаются бораны (гидриды бора). Они имеют очень высокую теплотворность — выше 15 000 $\text{ккал}/\text{кг}$. Диборан B_2H_6 относится к числу криогенных компонентов с умеренно низкой температурой кипения — 92°C . Его теплотворность при образовании твердого борного ангидрида около 17 000 $\text{ккал}/\text{кг}$, но плотность невысокая — 0,43 при температуре кипения. Пентaborан B_5H_9 (см. табл. 1 и 3) — легкая жидкость, его теплотворность при образовании твердого борного ангидрида 16 200 $\text{ккал}/\text{кг}$, а газообразного 12 100 $\text{ккал}/\text{кг}$. Смеси паров пентaborана с воздухом взрывоопасны и могут самовоспламеняться. Бораны чрезвычайно ядовиты (вызывают поражение центральной нервной системы). Менее ядовиты жидкые углеводородные производные боранов (например, этилпентaborан). Теплота сгорания боранов существенно больше при конденсации продукта окисления бора B_2O_3 (высшая теплотворность, см. табл. 2). Это может быть реализовано только при расширении газа в сопле, что приведет к снижению термического к. п. д. В связи с этим

¹ По другим данным до 600 $\text{кГ}\cdot\text{сек}/\text{кг}$.

эффективность гидридов бора в большей мере, чем других горючих, зависит от конкретных условий рабочего процесса [73, 128, 133].

Свободные радикалы

Еще большую удельную тягу, чем от самых эффективных комбинаций окислителей и горючих, в принципе можно получить за счет химической энергии свободных радикалов — вещества, находящегося в химически нестабильном состоянии, но технические пути его использования не ясны. Это предел, выше которого поднять эффективность химических топлив вообще невозможно. Свободными радикалами называются частицы, обладающие свободной валентностью (не соединенные в молекулы атомы водорода Н, кислорода О, азота N; группы атомов CH₃, CH₂, C₂H₅ и др.). Диссоциация (распад) молекул на свободные радикалы происходит с поглощением энергии извне; при ассоциации она выделяется. Так, для диссоциации 1 кг молекулярного водорода на атомы (H₂ → H + H) необходимо затратить 51 300 ккал/кг; при соединении атомов водорода в молекулы (H + H → H₂) эта энергия идет на нагрев газа (данный процесс уже давно находит практическое применение в атомноводородной электросварке). Водород (и другие горючие элементы) кроме выделения теплоты при ассоциации может реагировать с окислителем, в результате чего теплота ассоциации суммируется с теплотой сгорания (51 300 + 28 700 = 80 000 ккал/кг, что почти в 2,8 раза больше обычной теплоты сгорания водорода).

Свободные радикалы в обычных условиях могут существовать до первого столкновения друг с другом (порядка миллионных — тысячных долей секунды). Чтобы использовать свободные радикалы в качестве топлива, надо каким-то образом их «законсервировать». Пока это удается сделать только путем глубокого охлаждения до температур, близких к абсолютному нулю (например, атомарный водород, кислород и азот при 4°К), когда столкновения частиц практически прекращаются. Для этого необходимы сложные и тяжелые холодильные установки с жидким гелием. При таких температурах атомарное вещество представляет собой светящееся твердое тело. При нагреве до 30—40°К происходит активная ассоциация, сопровождаемая выделением большого количества тепла и возникновением пламени. Замороженное «радикальное» вещество весьма опасно в обращении — случайный нагрев может вызвать реакцию во всей его массе и взрыв огромной силы (для атомарного водорода — подобный взрыву атомной бомбы) [47, 73, 131].

Свободные атомы в атмосфере

В земной атмосфере на высоте 80—100 км под воздействием ультрафиолетовых лучей Солнца молекулы кислорода и азота расщепляются на атомы. Сохранению их в свободном виде способствует очень низкое давление (0,01 мм рт. ст. и ниже), когда их столкновения становятся редкими. Темпера тура ассоциации атомарного кислорода (O + O → O₂) 3640 ккал/кг, азота (N + N → N₂) 6050 ккал/кг. С помощью катализаторов нужно заставить их ассоциировать в молекулы внутри двигателя летательного аппарата, который может быть выведен на орбиту высотой 80—100 км. Необходимо для этого сжатие в диффузоре прямоточного двигателя может быть достигнуто при числе $M=7 \div 10$. Если доля ассоциирующего газа составит даже 3—4% воздуха, проходящего через двигатель, то выделение тепла на единицу веса воздуха будет уже примерно таким, как в современных ТРД. Аппарат на таком топливе будет иметь неограниченную дальность полета [73].

Природа ядерного топлива

Дальнейшее повышение удельной тяги может быть обеспечено применением ядерного топлива в качестве источника тепловой энергии (до $P_{уд} \approx 1000 \div 3000 \text{ кГ} \cdot \text{сек}/\text{кг}$), в качестве источника электрической энергии (до $P_{уд} \approx 50000 \text{ кГ} \cdot \text{сек}/\text{кг}$) и, наконец, источника излучения — потока фотонов ($P_{уд} \approx 3 \cdot 10^7$, т. е. 30 млн $\text{кГ} \cdot \text{сек}/\text{кг}$). При этом помимо ядерного топлива должны дополнительно использоваться источники рабочего тела.

При ядерных процессах один вид материи — в веществе (т. е. материя, обладающая массой в состоянии относительного покоя) превращается в другой вид материи — электромагнитное излучение, частицы которого — фотоны движутся со скоростью света 300 000 км/сек. Фотоны при столкновении с частицами вещества поглощаются и отдают свою энергию, которая в конечном счете идет на нагрев вещества. Полное превращение 1 кг массы вещества в энергию — так называемая *аннигиляция* — дает 21,5 триллиона килокалорий. Она происходит при взаимодействии античастиц — электрона и позитрона, протона и антипротона, нейтрона и антинейтрона и др. Отдельные античастицы в настоящее время удается получить с помощью мощных электромагнитных ускорителей, самые крупные из которых созданы в Советском Союзе. Однако выделить и сохранить «антивещество» в близкой перспективе не представляется возможным. Некоторая доля массы вещества превращается в энергию при распаде тяжелых атомных ядер и при синтезе (соединении) легких атомных ядер. Первый из этих процессов, лежащий в основе атомной бомбы и атомных реакторов, в настоящее время в общем освоен, и, как известно, практически используется для приведения в действие стационарных и судовых двигателей. Второй же из них, естественно идущий на Солнце и в звездах, пока освоен только в форме взрыва (водородной бомбы). Проводимые в СССР и за границей работы позволяют надеяться, что будет освоено управление и этим процессом.

Выделение энергии при распаде и синтезе атомных ядер обусловлено разницей энергий «упаковки» элементарных частиц — протонов и нейтронов в атомных ядрах различных химических элементов. Суммарная масса протонов и нейтронов, соединенных друг с другом в ядре атома, меньше суммы масс того же количества отдельно взятых протонов и нейтронов. На их соединение пошла энергия, эквивалентная дефекту (уменьшению) их массы. Для элементов, находящихся в середине таблицы Менделеева, она больше, чем для самых легких и самых тяжелых элементов. Поэтому соединение ядер легких элементов (дейтерия, трития, лития) и деление тяжелых ядер (например, урана, плутония) на части, являющиеся ядрами элементов середины периодической системы, идет с выделением энергии, равной разности энергий «упаковки» [47, 55, 74].

Расщепляющееся ядерное топливо

Энергия освоенных в настоящее время реакций деления изотопов урана-235, урана-233 и плутония-239 равна примерно 16 миллиардам ккал/кг. Столько тепла дает сжигание 1500 т обычного нефтяного авиационного топлива. В активной зоне реактора теплового ядерного двигателя энергия разлетающихся осколков деления атомных ядер и электромагнитного излучения поглощается и превращается в тепловую энергию. Она передается рабочему телу двигателя непосредственно или через теплоноситель (например, расплавленный натрий или калий, или их сплав), который циркулирует между активной зоной и радиатором, нагревающим рабочее тело [55, 74, 119].

Рабочее тело тепловых и электротермических ядерных двигателей

Самым выгодным рабочим телом ядерного теплового ракетного двигателя благодаря высокому удельному объему является естественно водород. Чтобы улучшить его нагрев тепловым излучением (которое практически не поглощается водородом до 7000° К), в него могут быть введены добавки углерода или металлов, уменьшающих прозрачность. В качестве рабочего тела могут быть применены также аммиак и вода. Предполагается, что при использовании водорода ядерные ракетные двигатели с твердой активной зоной будут иметь удельную тягу до 750—900 кГ·сек/кг, с пылевой до 1000—1100 кГ·сек/кг, с жидкой до 1500 кГ·сек/кг, с газовой до 2500—3000 кГ·сек/кг. Такие же значения удельной тяги могут быть достигнуты в простейших электроракетных двигателях — электротермических с преобразованием ядерной энергии в электрическую, которая используется в омических нагревательных элементах или электродуговом

подогревателе. Их рабочим телом могут служить те же водород, аммиак, вода. При небольшой тяге таких двигателей запас рабочего тела может храниться не в конденсированном виде, а в газообразном при высоком давлении. В этом случае хорошим рабочим телом будет химически инертный гелий, по удельному объему занимающий второе место (после водорода). Его температура кипения близка к абсолютному нулю — около 4°К, что затрудняет хранение его в жидком виде [22, 55, 119].

Рабочее тело плазменных двигателей

При температуре в несколько тысяч градусов рабочее тело превращается в плазму — смесь ионного газа (заряженного положительно) и электронного газа (заряженного отрицательно). Наличие зарядов у частиц рабочего тела позволяет использовать для их разгона электрическое и магнитное поле (вместо газодинамического сопла). Электроракетные двигатели, в которых ускорение частиц плазмы основано на электродинамическом принципе, принято называть *плазменными*, а на электростатическом — *ионными*. В плазменном двигателе выталкивание рабочего тела происходит в результате пропускания электрического тока через плазму, находящуюся в магнитном поле (на плазму действуют те же силы, что на проводник в роторе электромотора). Исходным рабочим телом могут быть расплавленные *щелочные металлы* (натрий, калий, цезий) и другие низкоплавкие металлы (индий, галлий), *сuspensии* порошкообразных металлов в масле (например, алюминия), *гидриды металлов* (гидрид лития LiH, алюмогидрид лития LiAlH₄), твердые и жидкые *углеводороды*, *газы* — водород, гелий, азот. Выбор рабочего тела связан со способом его превращения в плазму и воздействием на материал двигателя. Последнее весьма существенно, потому что плазменные двигатели обычно рассчитывают на тягу от нескольких граммов до нескольких сотен граммов в течение весьма длительного периода действия (от многих часов до нескольких лет непрерывной работы). Впервые плазменные двигатели были практически применены на советском космическом аппарате — автоматической станции «Зонд-2» в 1966 г. Они работали в системе ориентации, поддерживая требуемое положение станции относительно Солнца [4, 22, 47, 126].

Рабочее тело ионных двигателей

В ионных двигателях от плазмы предварительно отделяются свободные электроны, а положительно заряженные ионы, несущие практически всю массу рабочего тела, разгоняются в электростатическом поле. В соответствии с законом Кулона они стремятся к катоду, по проходе которого нейтрализуются возвращающимися электронами. Скорость реактивной струи ионного двигателя порядка десятков — сотен километров в секунду; 1 квт электрической мощности может создать тягу около 3 г. Ионные двигатели, так же как и плазменные, предполагают использовать в течение длительного времени непрерывной работы с малой тягой (граммами) и соответственно небольшим расходом рабочего тела.

Главное требование к рабочему телу ионных двигателей — малая энергия ионизации. Наилучшим в этом отношении является цезий — белый мягкий металл. Его плотность в твердом состоянии 1,903 г/см³ (при 20°С), он плавится при 28,5°С, кипит при 670°С, чрезвычайно активен — самовоспламеняется на воздухе, бурно разлагает воду (с воспламенением вытесненного им водорода). Может быть использован химически менее активный и имеющий вдвое большую плотность гидрид цезия CsH, который содержит 99,25% цезия. При 400°С он разлагается, а дальнейший нагрев позволяет получить практически чистый парообразный цезий. Может быть применена также ртуть — единственный жидкий при обычных температурах металл. Плотность ртути 13,56 г/см³ (при 20°С), она замерзает при —38,9°С, кипит при 357°С, заметно летучая при обычных температурах. В химическом отношении ртуть почти так же стойкая, как серебро. В противоположность цезию ртуть имеет высокий потенциал ионизации. В ионном двигателе пары ртути ионизируются не путем отрыва собственных электронов, а с помощью специального ионизатора, катод которого испускает поток электронов [22, 47, 126].

Термоядерное топливо

Более далекой перспективой считается использование в двигателях летательных аппаратов термоядерных реакций, идущих в плазме при температуре в миллионы градусов,— соединения атомных ядер *дейтерия, трития* (тяжелого водорода с атомными весами 2 и 3), *лития* и взаимодействующих с ними нейтронов. Они дают значительно больше энергии, чем распад тяжелых ядер,— от 25 до $154 \cdot 10^9$ (154 миллиарда) ккал/кг. Предполагается возможным сжигать плазму в шнур и изолировать ее от окружающих материалов с помощью магнитных полей, т. е. создать своего рода «магнитную бутылку» для плазмы, в которой будет идти термоядерная реакция. Практически неисчерпаемым источником энергии термоядерных двигателей может стать природная вода — каждая тонна ее содержит 16 г дейтерия. Его термоядерное превращение обеспечило бы получение из каждой исходной тонны воды в 400—500 раз больше энергии, чем сжигание тонны нефтяного топлива [55].

Накопление вещества извне

На определенном этапе развития техники может стать реальным использование зaborных источников топлива и рабочего тела. Так, при полете орбитального летательного аппарата в верхних слоях атмосферы возможны накопление *азота* и *кислорода*, подача их в ожигающую установку и разделение в целях использования жидкого кислорода в качестве окислителя в химическом двигателе. В космическом пространстве предполагается накопление и превращение в топливо и рабочее тело чрезвычайно разреженного межзвездного вещества [47, 124].

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

Глава 6

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основные понятия

Смазочными материалами машин и механизмов называются вещества, искусственно вводимые между их взаимно перемещающимися деталями в целях уменьшения трения и его вредных последствий. Непроизводительная затрата мощности на преодоление трения благодаря смазке снижается в десятки и сотни раз. При современных скоростях и нагрузках узлы трения двигателей и силовых передач разрушились бы без смазки в течение нескольких секунд из-за задира, заклинивания или расплавления и сваривания деталей выделенным при трении теплом.

Антифрикционное (т. е. уменьшающее трение) действие смазочного материала может быть основано на двух различных по своей природе явлениях. Первое — образование тончайшей защитной пленки на поверхности контакта твердых тел, *гравитационная смазка*. Трение при чисто граничной смазке остается по своему характеру внешним, как и при отсутствии смазки (его отличительный признак — скачок скорости на поверхности контакта). Такое действие смазочного материала является основным при качении, при зубчатом и червячном зацеплении, т. е. при тех формах трения, которые характерны для подшипников ротора и для редукторов; при скольжении оно наблюдается в случае высокого удельного давления или малой скорости. Свойства смазочного материала, обеспечивающие граничную смазку, называются *смазывающей способностью*.

Второе явление, на котором может быть основано антифрикционное действие смазочного материала, — разделение твердых тел при достаточно высокой скорости их относительного скольжения непрерывным слоем жидкости, *гидродинамическая¹ смазка* (ее называют также *жидкостной*). Характер трения при этом корен-

¹ Соответственно при использовании газообразного смазочного материала такого рода смазку называют аэродинамической; существует также аэростатический принцип смазки.

ным образом изменяется, внешнее трение твердых тел заменяется внутренним трением, т. е. вязкостью жидкости или газа (отличительный признак внутреннего трения — плавное изменение скорости от слоя к слою в направлении, нормальном к поверхности скольжения). При чисто гидродинамической смазке полностью предотвращается фрикционный износ деталей. Однако в ответственных узлах трения современных газотурбинных двигателей она реализуется лишь частично; в большей мере она используется в поршневых двигателях. Обычно наблюдаются те или иные формы сочетания гидродинамической и граничной смазки [12, 49, 59].

Виды и функции смазочных материалов

В современной технике используются смазочные материалы различного агрегатного состояния — жидкые, твердые и газовые, а также смешанные (двухфазные). Преимущественное применение в двигателях и различных механизмах летательных аппаратов имеют жидкие смазочные материалы — *смазочные масла*. Перспективными при высокой рабочей температуре узлов трения двигателей считаются твердые (микрослоистые) и газовые смазки; в настоящее время они имеют ограниченное применение. В различных агрегатах и узлах авиационной и ракетной техники широко используются двухфазные (микронеоднородные) *консистентные смазки*, состоящие из жидкого масла и твердого загустителя. Наряду с чисто газовыми смазками могут быть двухфазные смазки на газовой основе — аэрозоли (масляный туман, дымообразная сухая смазка).

Все виды смазочных материалов выполняют в машинах и механизмах *две главные функции* — уменьшают силу трения между взаимно перемещающимися деталями и защищают их трещицеся поверхности от износа. Кроме того, жидкие и газовые смазочные материалы выполняют *третью функцию*, также относящуюся к числу главных, — отводят тепло, в которое преображается работа трения. При смазке скоростных узлов трения эта функция не менее важна, чем первые две. Ее не выполняют твердые (сухие) и консистентные (пластичные) смазки, нетекущие при рабочей температуре.

Наряду с главными функциями смазочные материалы могут выполнять те или иные *дополнительные функции* — предохранять детали от коррозии, обеспечивать уплотнение зазоров между деталями (предотвращать перетекание газов через зазоры), выносить частицы износа из узлов трения. В некоторых случаях маслом или газовой смазкой охлаждаются детали двигателей, нагретые горячими газами. Наконец, масло может попутно использоваться в качестве рабочей жидкости гидроустройств.

К числу смазочных материалов принято относить не только антифрикционные, но и сходные с ними по природе *консервационные* и *уплотнительные* смазки. Некоторые из функций, которые

выполняются антифрикционными смазочными материалами попутно как дополнительные, для этих двух классов смазок являются основными. Консервационные смазки специально предназначены для защиты разнообразных технических изделий от коррозии и внешнего загрязнения, а уплотнительные — для герметизации резьбовых и других неподвижных соединений, кранов, сальников, технологических швов и т. п. [49, 59].

Классификация

На рисунке 35 дана примерная схема классификации авиационных смазочных материалов по целевому назначению (верхняя часть схемы) и по составу (нижняя часть схемы). На первое место вынесены *синтетические масла*, поскольку в ближайшей перспективе они являются главными в авиационной технике. Традиционные *нефтяные масла* отступают на второй план; регулирование их химического состава и комплекс присадок привращают их по существу в полусинтетические.

Консистентные смазки на основе нефтяных масел и других природных продуктов уже давно содержат синтетические загустители и присадки; они в основном применяются в узлах трения, работающих при не очень жестких условиях. Для узлов и механизмов, которые подвергаются сильному нагреву или соприкасаются с агрессивными веществами, нужны синтетические консистентные смазки, твердые и газовые смазочные материалы. Предполагается, что в будущем твердые и газовые смазки могут оказаться необходимыми и в двигателях летательных аппаратов (на рис. 35 вероятность использования тех или иных смазочных материалов в дальнейшей перспективе отмечена штриховыми линиями) [59, 70, 71].

ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ, ГРАНИЧНАЯ СМАЗКА И СМАЗЫВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

Природа внешнего трения и граничной смазки

Внешним трением твердых тел (в том числе деталей машин и механизмов) называется сопротивление их перемещению относительно друг друга, которое возникает на поверхности их соприкосновения. Из-за неровностей микрорельефа реальных тел действительный контакт между ними имеет только на отдельных участках, составляющих незначительную долю номинальной поверхности соприкосновения. При наличии прижимающей силы истинное давление на таких участках очень велико, в результате чего происходит внедрение микронеровностей одного тела в материал другого. Образуется множество дискретных (т. е. прерывистых, отдельных) фрикционных связей между телами, так называемых мостиков. Их возникновение и разрушение при относительном перемещении (скольжении) тел проявляется в форме силы трения и фрикционного износа поверхности.

Сила трения действует в плоскости касания тел противоположно направлению движения. Она зависит от факторов, определяющих прочность и число фрикционных связей — от условий контакта (прижимающей силы, температуры), от микрорельефа поверхностей (он зависит от их исходной обработки, а также от дальнейшей приработки и износа), от механических свойств поверхностного слоя материалов (твердости, упругости, предельного напряжения сдвига), от физических свойств (неуравновешенного электрического поля поверхностей, диффузии, температуры плавления), от химических свойств (склонности к окислению, возможности образования в мостики химических связей).

В первом приближении *сила внешнего трения твердых тел пропорциональна нормальной силе P* (рис. 36), с которой перемещающее тело прижимается к поверхности контргнета (закон Амонтана):

$$F = fP, \quad (6.1)$$

где f — коэффициент трения.

При отсутствии смазки в воздушной среде минимальные значения f ($f=0,15 \div 0,20$) наблюдаются при трении стальных, чугунных, бронзовых поверхностей и их сочетаний; для большинства других металлов $f=0,3 \div 0,8$, а при трении меди по меди $f=1,3$. Для разнородных материалов он обычно меньше, чем для однородных. Введение граничной смазки, т. е. столь тонкой пленки смазочного материала, при наличии которой сохраняется твердый контакт, снижает коэффициент трения в несколько раз ($f=0,01 \div 0,1$).

Фрикционный износ, представляющий собой постепенное изменение размеров деталей по их поверхности в результате внешнего трения¹, обусловлен деформацией или отрывом материала в зоне отдельных микронеровностей. Процессы микрорезания, вырывания, пластической деформации (рис. 36, а), протекающие даже при невысоких нагрузках без смазки, сначала приводят к увеличению шероховатости, появлению царапин, а затем перерастают из микроявлений в схватывание и задир по значительным участкам поверхности. В конечном счете происходит заедание или поломка механизма. Граничная смазка при не слишком высокой нагрузке предотвращает эти опасные явления. Адсорбированная поверхностью металла или химически соединенная с ней граничная пленка воспринимает часть деформации или разрушается вместо поверхностного слоя трущихся деталей. Это способствует уменьшению деформации металла в зоне каждого мостика. Если деформация не выходит за предел упругости, то

¹ Помимо трения износ может вызываться механическим воздействием песка, стружки и других твердых частиц, попавших между сопряженными деталями (абразивный износ), резкими колебаниями давления или кавитации в жидкости (кавитационный износ), а также химическими агентами, в том числе содержащимися в смазочном материале (коррозионный износ).

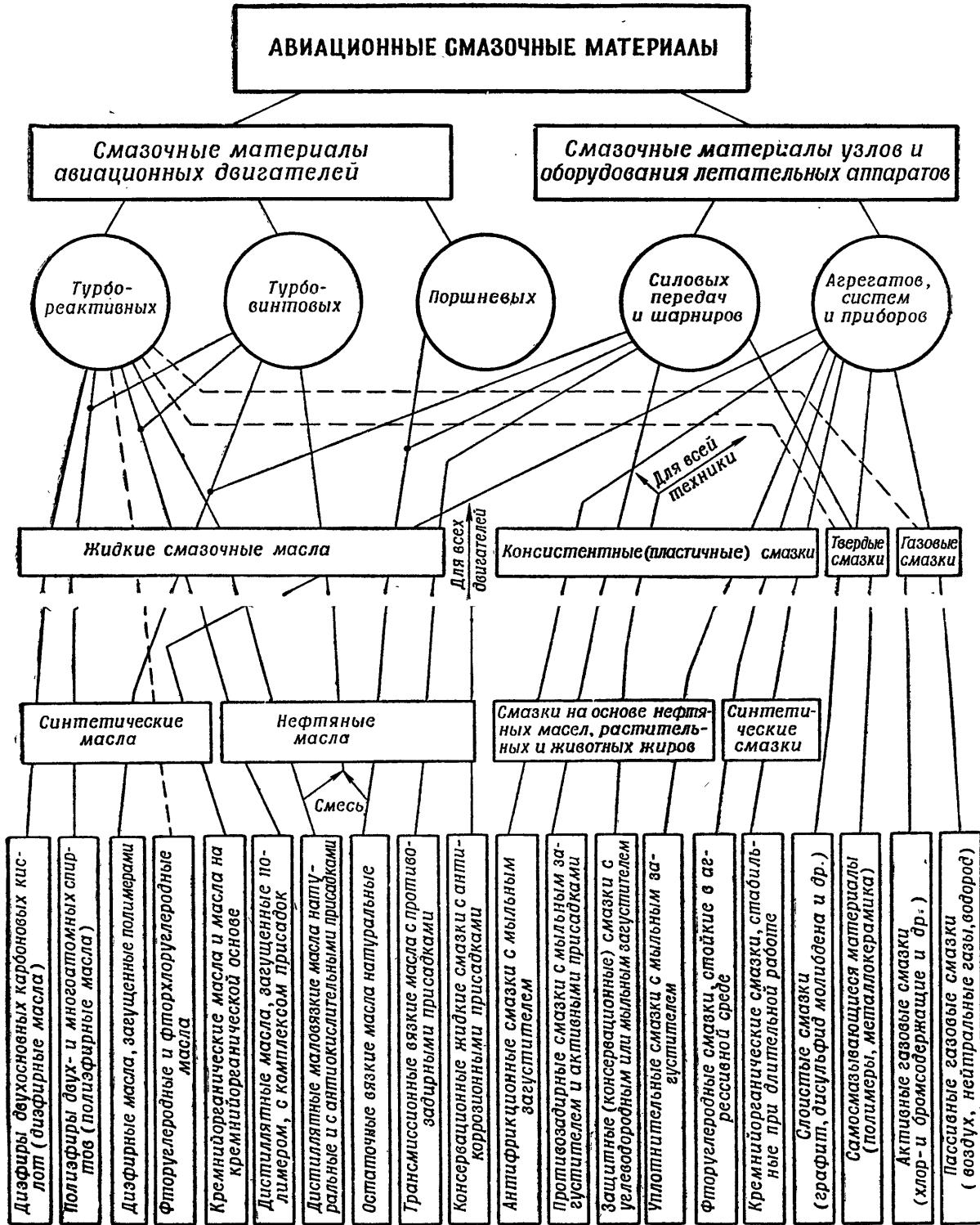


Рис. 35. Классификация авиационных смазочных материалов

микронеровности обтекают ся контрателом (рис. 36, б). Износ в этом случае происходит главным образом за счет таких микронеровностей, которые резко выступают за границу основной, гладкой части смазочной пленки. Обычно он невелик, в начальный период эксплуатации нового или отремонтированного узла трения он способствует при работе деталей [12, 36, 49, 59].

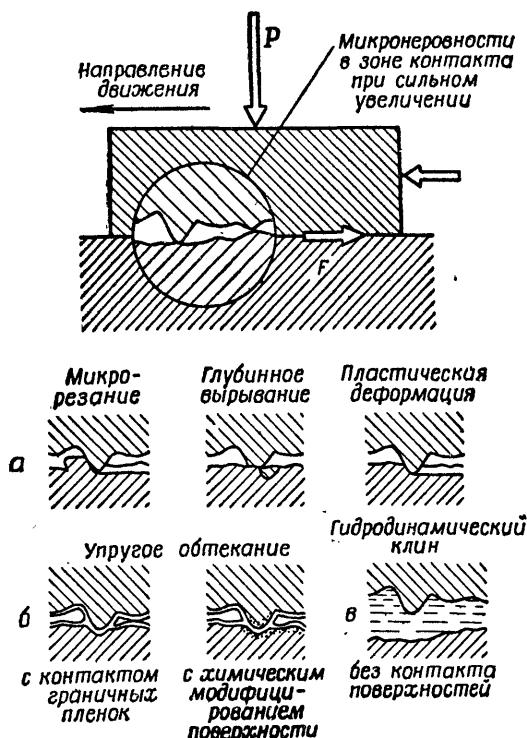


Рис. 36. Явления в зоне единичной микронеровности при трении:

вверху — принципиальная схема; *а* — внешнее трение с разрушением или остаточной деформацией поверхности при отсутствии смазки (или недостаточной смазке); *б* — внешнее трение с упругим контактированием при граничной смазке; *в* — внутреннее (жидкостное) трение в слое смазки

Трение качения

Граничная смазка играет существенную роль в обеспечении долговечности подшипников качения — главного типа узла трения современных авиационных двигателей. Сила, прижимающая шарик или ролик к обойме, деформирует их (рис. 37). Создается сопротивление качению: катящееся тело должно деформировать образовавшийся перед ним барьер. Периодическая деформация

вызывает усталостный износ, появление микротрещин, слияние их и точечное выкрашивание — так называемый *питтинг*. Границная масляная пленка, не разрушающаяся при высоких контактных нагрузках, понижает усталостный износ; она деформируется в первую очередь, уменьшая контактные напряжения и деформацию металла. При движении тел качения происходит также их проскальзывание относительно лунки в упруго деформированной поверхности колец; граничная смазка снижает коэффициент трения скольжения между ними. В некоторых подшипниках качения граничный

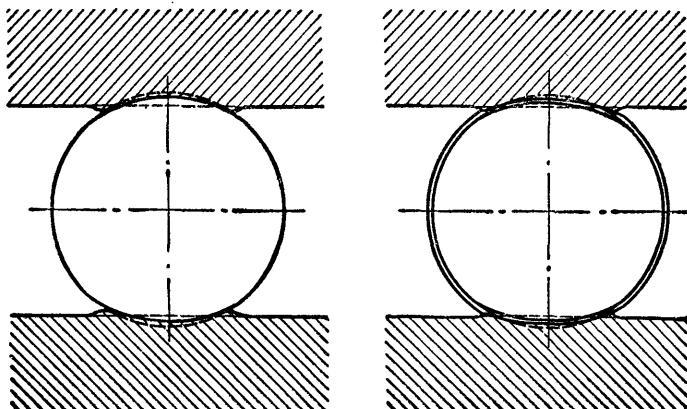


Рис. 37. Схема деформации обоймы и шарика (ролика) в подшипнике качения при отсутствии и при наличии граничной смазки

характер смазки наблюдается и на других участках скольжения шариков и роликов в подшипниках — в зоне контакта с сепараторами, с бортиками беговых дорожек (в скоростных подшипниках качения на этих участках, по-видимому, создается гидродинамический смазочный слой).

Общий коэффициент трения при нормальной смазке авиационных подшипников качения порядка 0,001—0,007 (меньшее значение для шариковых, большее для роликовых подшипников) [11, 49, 57, 59].

Природа смазывающей способности

Физико-химическая основа образования граничной пленки и, следовательно, смазывающей способности — явления адсорбции и хемосорбции¹. Сущность адсорбции состоит в электрическом взаимодействии ионов или электрически заряженных частей молекул жидкости с электрическим полем атомов и ионов металла, образующих твердую поверхность. Например, отрицательно заряженные части молекул жидкости притягиваются к положительно

¹ Образовано из латинских слов *chemie* — химия и *sorbere* — поглощать, т. е. «химическое поглощение» (частиц масла твердым телом).

заряженным ионам поверхности металла (рис. 38); к первому ряду полярных молекул пристраиваются следующие. В результате на поверхности металла из масла собираются такие вещества, в молекулах которых электрические заряды распределены неравномерно (их называют *поверхностноактивными*). К их числу относится большинство синтетических масел, за исключением полисилоксановых.

Носителями смазывающей способности нефтяного масла являются содержащиеся в нем примеси поверхностноактивных

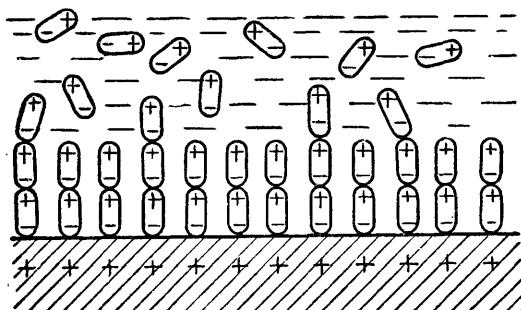


Рис. 38. Схема образования граничной пленки из полярных молекул жидкости на твердой поверхности

веществ — органических кислот, фенолов, смолистых и других органических соединений, содержащих кислород, серу и азот. Они проявляют значительно большие силы сцепления с металлической поверхностью, чем углеводородная основа нефтяного масла, молекулы которого неполярны (электрический центр тяжести их положительного и отрицательного зарядов практически совпадает). Если в масле недостаточно собственных поверхностноактивных веществ, они могут быть добавлены в него искусственно; соответствующие присадки к маслу называются *противоизносными*. Так, в трансформаторное масло для смазки ТРД одно время добавлялась в качестве противоизносной присадки стеариновая кислота (0,1%).

Адсорбированный поверхностный слой по своим свойствам резко отличается от той жидкости, из которой он образовался. Хаотического теплового движения молекул, характерного для жидкости, в нем нет; он скорее напоминает кристаллическое твердое тело с упорядоченным расположением молекул, и поэтому может быть назван *квазикристаллическим*. Граничное трение внутри такого слоя можно сравнить с трением при сдвиге листов в стопке бумаги: подобно им слои молекул в граничной масляной пленке, не разрушаясь, сдвигаются относительно друг друга.

Иногда между граничным слоем смазки и поверхностью металла устанавливаются химические связи, образуется тонкий поверхностный слой нового вещества (сульфида, хлорида, мыла и т. д.). Это явление, называемое *хемосорбцией*, обеспечивает еще более прочную связь граничной смазки с поверхностью металла. По существу это переходная форма к окисным и другим

поверхностным пленкам, представляющим собой уже не смазочный материал, а химически модифицированный слой основного материала деталей.

Толщина граничного слоя смазки порядка десятых долей микрона. Ее можно представить так: если с гладкой металлической поверхности, смазанной маслом, насухо стереть масло, то оставшаяся пленка и представляет собой прилипший к металлу граничный слой. Небольшая толщина граничного слоя смазки объясняется тем, что уже на незначительном расстоянии от поверхности металла хаотическое тепловое движение молекул преобладает над силами поверхностного притяжения. Более вязкие масла образуют более толстый граничный слой, так как в них тепловое движение молекул замедлено. Поэтому из масел одинаковой химической природы лучшей смазывающей способностью обладают более вязкие масла.

Граничный слой смазки эффективен только при кратковременных и не очень высоких нагрузках. Длительные нагрузки на одних и тех же участках или очень большие, даже непрерывные, нагрузки способны вызвать настолько сильный разогрев его, что хаотическое тепловое движение молекул преодолевает действие поверхностных сил и разрушает упорядоченные слои молекул [13, 18, 37, 59, 67].

Оценка смазывающей способности

Прочность пленки смазочного материала как одну из характеристик его смазывающей способности принято оценивать величиной максимальной нагрузки, которую пленка способна выдержать до разрушения. Испытание обычно проводится на четырехшариковой машине трения (рис. 39), сокращенно ЧШМ. По результатам серии одноминутных испытаний, проводимых при различной нагрузке, строится диаграмма износа (рис. 40). Признаком разрушения пленки является резкое усиление износа с повышением нагрузки, характеризуемое точкой излома диаграммы износа. Соответствующая нагрузка начала заедания, или *критическая нагрузка* ($P_{кр}$), нормируется техническими требованиями к некоторым маслам. Смазывающую способность определяют также и на других машинах трения, предназначенных для испытаний смазочных материалов, по снижению коэффициента трения. Оно неодинаково для разных металлов [57, 59].

Тяжелые режимы трения

Сверхкритические нагрузки, при которых граничная смазочная пленка разрушается, могут быть в редукторных и червячных силовых передачах. Предотвращение задира на таких режимах зависит от химических процессов в поверхностном слое металла. Условием трения без задира является положительный градиент прочности, т. е. возрастание прочности в глубину материала трущейся детали. Он обеспечивается, если на

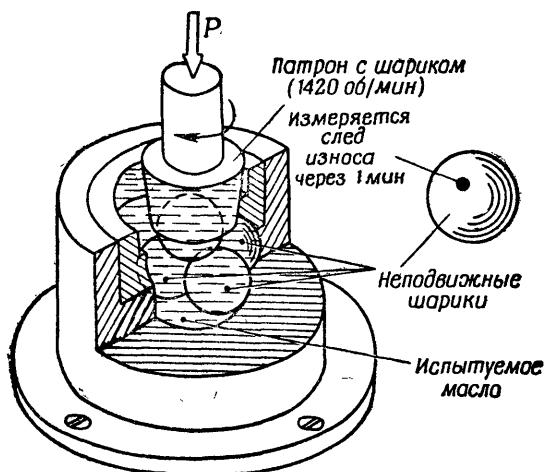


Рис. 39. Узел трения четырехшариковой машины для оценки смазывающей способности

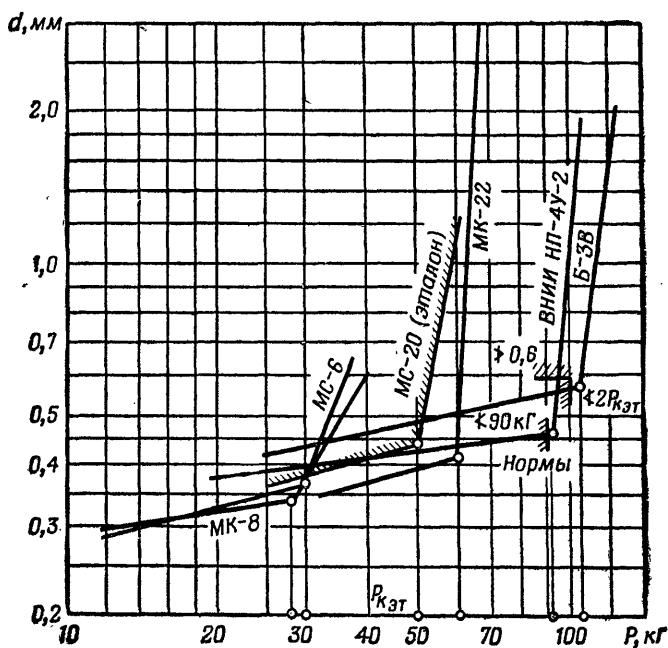


Рис. 40. Оценка противоизносных свойств масел на четырехшариковой машине: примерные зависимости диаметра пятна износа d от нагрузки P ; излом соответствует критической нагрузке разрушения масляной пленки

поверхности металла создается пленка окислов, сульфидов, хлоридов и других, которая обладает меньшим сопротивлением сдвигу и легче разрушается при контакте с контролем, чем нижележащие слои металла. Тогда процессы разрушения не затрагивают нижележащие слои, а износу подвергается только химически модифицированный тонкий поверхностный слой. Не менее важно, чтобы разрушенные пленки мгновенно восстанавливались. Это происходит при доступе к трущимся поверхностям кислорода, диффундирующего через смазочный слой или растворенного в масле [12, 18].

Противозадирные свойства

Защита от задира окисными пленками недостаточно надежна. Положительную роль в этом отношении играет примесь соединений серы, естественно содержащихся в масле; они обеспечивают образование сульфидных пленок. Наиболее эффективным является искусственно введение в масло фосфорогорганических, сераорганических и хлорогорганических соединений, которые при высокой температуре разлагаются и образуют фосфиды, сульфиды и хлориды металлов. Такие присадки (трикрезилфосфат, меркаптобензоизол, совол и др.) называются *противозадирными*. Быстроота химических процессов на поверхности металла в случае тяжелых режимов трения обеспечивается резким местным нагревом контактирующих микроучастков. Температурные вспышки при разрушении триботрещин достигают нескольких сот и даже тысяч градусов.

Образующиеся на поверхности трения вещества имеют, как правило, более низкую температуру плавления, чем нижележащие слои металла, и в моменты температурных вспышек кратковременно переходят в жидкое состояние. В результате уменьшается сопротивление сдвигу, работа трения и тепловыделение; предотвращается расплавление самого металла, схватывание и задир сопряженных поверхностей трущихся деталей.

Противозадирные качества смазочного материала особенно важны в таких условиях, когда поверхности трения лишены доступа кислорода и возможности естественного образования защитных окисных пленок.

Износ, неизбежный при тяжелых режимах трения, обычно не вызывает ухудшения качества поверхности; более того, происходит ускоренная ее приработка, выглаживание (особенно под действием фосфорсодержащих присадок) [12, 18, 59].

ВЯЗКОСТЬ (ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ) СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гидродинамическая смазка

В узлах трения с гидродинамическим режимом смазки взаимно перемещающиеся детали не соприкасаются (рис. 36, в), трение

происходит между слоями разделяющей их жидкости. Внутреннее трение жидкости — это не что иное, как вязкость¹.

Как следует из формулы (1.16), при жидкостном трении с постоянным поперечным градиентом скорости $\frac{dv}{dn} = \text{const}$ сила трения F , приходящаяся на единицу поверхности скольжения S , пропорциональна динамической вязкости смазочного материала μ , скорости скольжения трущихся тел относительно друг друга v и обратно пропорциональна толщине слоя масла между поверхностями h

$$\frac{F}{S} = \mu \frac{v}{h}. \quad (6.2)$$

Эта упрощенная формула была предложена автором гидродинамической теории смазки проф. Н. П. Петровым (1883 г.) для определения силы трения в подшипниках скольжения.

В трущейся паре вал — подшипник масло, обволакивающее вал, вследствие внутреннего трения увлекает соседние слои масла в клиновидную часть зазора. Создается давление, приподнимающее вал. Вращающийся вал «накачивает» под себя масло и всплывает на созданном им самим масляном потоке. Чем выше вязкость масла, тем большую нагрузку может выдержать масляный клин. Аналогично этому при возвратно-поступательном движении поршня в цилиндре силы внутреннего трения затягивают в зазор прилегающие к поршню слои масла. Создается давление, которое оттесняет поршень от стенки цилиндра; поперечные силы передаются от поршня стенке цилиндра через слой масла без твердого контакта.

Максимальное удельное давление $p_{уд} = \frac{P}{S}$, которое может выдержать гидродинамический слой смазки, выражается полуэмпирической формулой

$$p_{уд} = \mu v \Phi \quad (6.3)$$

или

$$\mu \frac{n}{p_{уд}} = \Phi', \quad (6.3')$$

где n — число оборотов в минуту;

Φ или Φ' — функции геометрии и условий работы узла трения, определяемые экспериментально.

Из формулы (6.3) следует, что *несущая способность* гидродинамического смазочного слоя, так же как и сила жидкостного трения по формуле (6.2), *увеличивается с повышением вязкости смазочного материала μ и скорости скольжения v* . Таким образом, с точки зрения выбора вязкости масла создается противоречие. С одной стороны, желательно использовать масло возможно большей вязкости, так как она увеличивает несущую способность (допустимое $p_{уд}$) и, следовательно, надежность гидро-

¹ О вязкости, единицах ее измерения и способе определения см. стр. 36.

динамической смазки, предотвращает выдавливание масла из зазора. С другой стороны, чем выше вязкость масла, тем больше сила трения и потери мощности на преодоление трения, в связи с чем желательно применять менее вязкие масла [11, 36, 70].

Выбор вязкости масла

Исходя из этого и учитывая зависимость вязкости масел от температуры, для каждого двигателя или механизма экспериментальным путем подбирают масло с минимальной вязкостью, при которой обеспечивается жидкостное трение на самом высоком температурном режиме его работы (рис. 41, справа). Как видно из формулы (6.3'), она должна быть тем больше, чем ниже скоростной режим n и выше удельное давление. Для широкого диапазона нагрузки и числа оборотов существует оптимальное значение параметра $\mu_l/p_{уд}$, которому соответствуют наименьшие потери мощности на трение. При уменьшении μ или n , как и при увеличении $p_{уд}$, мощность трения растет из-за возникновения твердого контакта, а с увеличением $\mu_l/p_{уд}$ сверх оптимального значения возрастают силы внутреннего трения и затрата мощности на их преодоление.

При гидродинамическом режиме смазки и правильно подобранным масле коэффициент трения скольжения, определенный применительно к формуле (6.1), в десятки и сотни раз меньше, чем при внешнем трении без смазки ($f=0,01 \div 0,001$) [59, 70].

Влияние давления

При высоком удельном давлении вязкость масла возрастает по экспоненциальному закону:

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p_{уд}}, \quad (6.4)$$

где μ_0 — вязкость при атмосферном давлении; коэффициент $\alpha=0,0023 \div 0,0030$ для нефтяных масел (большие значения α соответствуют более вязким маслам).

Рост вязкости нефтяных масел становится заметным при $p_{уд} > 100$ атмосфер, что вполне реально для узлов трения авиационных двигателей и способствует сохранению гидродинамической смазки при повышении нагрузки. Вязкость некоторых синтетических масел начинает расти только при давлении больше тысячи или нескольких тысяч атмосфер (например, метил- и этилполисилоксанов). Темп повышения вязкости сначала невелик, но по мере роста давления вязкость увеличивается все более резко, вплоть до полного затвердевания масла. С повышением температуры масла влияние давления на вязкость ослабевает.

Вязкость масла для подшипников качения

Существует некоторая оптимальная вязкость масла, обычно небольшая, которая обеспечивает наибольшую долговечность подшипника качения. При меньшей вязкости не обеспечивается гидродинамическая смазка сепараторов и бортиков беговых дорожек, ухудшается граничная смазка из-за уменьшения толщины граничной пленки на участках твердого контакта. Слишком высокая вязкость увеличивает сопротивление качению шариков и роликов, особенно при обильной подаче масла, и усиливает нагрев

подшипников из-за трения. Одновременно ослабляется охлаждающее действие масла. Это может привести к отпуску и уменьшению твердости стали, а иногда даже вызвать перекристаллизацию, изменение размеров и искажение формы шариков и роликов, сепараторов [59].

Регламентация и саморегулирование вязкости

Нормы вязкости масел устанавливаются при температуре, более или менее соответствующей условиям их применения, чаще всего 100° С или 50° С; ее указывают индексом при букве, обозначающей вязкость. Исходя из практического удобства измерения регламентируется не динамическая (μ), а кинематическая вязкость ($\nu = \frac{\mu}{\rho}$). Иногда она указывается в марках масел, например МК-8 — масло с вязкостью $\nu_{50} \approx 8$ сст, МК-22 — с вязкостью $\nu_{100} \approx 22$ сст. У консистентных смазок измеряют и регламентируют непосредственно динамическую вязкость (μ) при силовом воздействии, поскольку под действием собственного веса они не текут.

Однако узлы трения не слишком чувствительны к вязкости смазочных материалов ввиду ее саморегулирования в широком диапазоне изменения эксплуатационных факторов. Когда вязкость слишком высока (например, из-за низкой температуры масла), то велика и работа трения. Она переходит в тепло, смазочный материал нагревается, и вязкость его понижается. Тот же эффект наблюдается при увеличении числа оборотов. Он полезен потому, что снижает сопротивление на высоких оборотах, когда гидродинамический режим смазки обеспечивается меньшей вязкостью. Вязкость консистентной смазки понижается также вследствие увеличения скорости деформации [59, 70].

ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНЫЕ И ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Значение и способы выражения

Вязкость смазочных материалов влияет не только на режим смазки, но и на ряд эксплуатационных характеристик — потребный крутящий момент при запуске, циркуляцию масла в системе смазки, охлаждающее действие масла, утечку его через уплотнения и т. д. Влияние на одни из этих характеристик проявляется при низких, а на другие — при высоких температурах масла. В связи с этим большое практическое значение имеют контроль и правильный учет вязкости масла во всем температурном диапазоне, реальном в эксплуатации. На рис. 41 приведена примерная схема эксплуатационных требований к вязкостно-температурным свойствам масла. Из схемы видно, что степень соответствия этим требованиям определяется *пологостью вязкостно-температурной характеристики*.

Регламентация и контроль пологости вязкостно-температурной характеристики масел производятся различными способами (рис. 42):

— ограничением вязкости по нижнему пределу при высокой температуре и по верхнему пределу при низкой температуре (например, для диэфирного масла ν_{100} не менее 3,2 сст, ν_{-40} не более 2000 сст);

— величиной отношения вязкостей при различных температурах (например, для масла МК-6 отношение ν_{-20}/ν_{50} не более 46,5; для масла МС-20 отношение ν_{50}/ν_{100} не более 7,85);

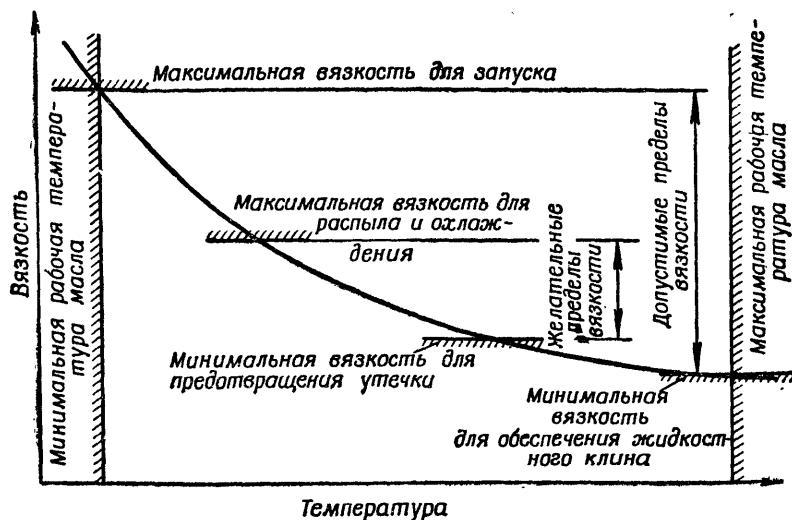


Рис. 41. Требования к вязкостно-температурным свойствам масел

— температурным коэффициентом вязкости в пределах температур от $t_a = -0^\circ\text{C}$ или 20°C до $t_b = 100^\circ\text{C}$, который определяется формулой $TKB = \frac{\nu_a - \nu_b}{(t_a - t_b) \nu_{50}}$ (например, для масла МК-22 $TKB_{20-100} = \frac{\nu_{20} - \nu_{100}}{\nu_{50}} \cdot 1,25$ не более 11);

— индексом вязкости (ИВ), который выражает пологость вязкостно-температурной кривой путем сравнения с кривыми эталонных масел (штриховые линии на рис. 42), а практически определяется с помощью таблиц по значениям ν_{50} и ν_{100} ; чем выше кривая, тем выше индекс вязкости (например, для масла МС-20С норма ИВ не менее 85) [36, 65, 70].

Пусковые свойства

Минимальная температура масла, до которой возможен запуск двигателя, определяется двумя факторами, связанными с увеличением вязкости масла при понижении температуры: ростом сопротивления раскрутке двигателя от стартера и уменьшением или прекращением подачи масла к узлам трения.

Главная часть момента сопротивления вращению при раскрутке двигателя на нехолодном масле обусловлена работой сжатия воздуха; доля трения в подшипниках и приводе маслоагрегатов составляет 3—5 %. Однако при понижении температуры она становится соизмеримой с затратой на сжатие воздуха. В результате увеличивается продолжительность и уменьшается надежность

запуска или он вообще становится невозможным, если мощности стартера не хватает для преодоления возросшего сопротивления раскрутки ротора. Максимальной вязкостью масла,

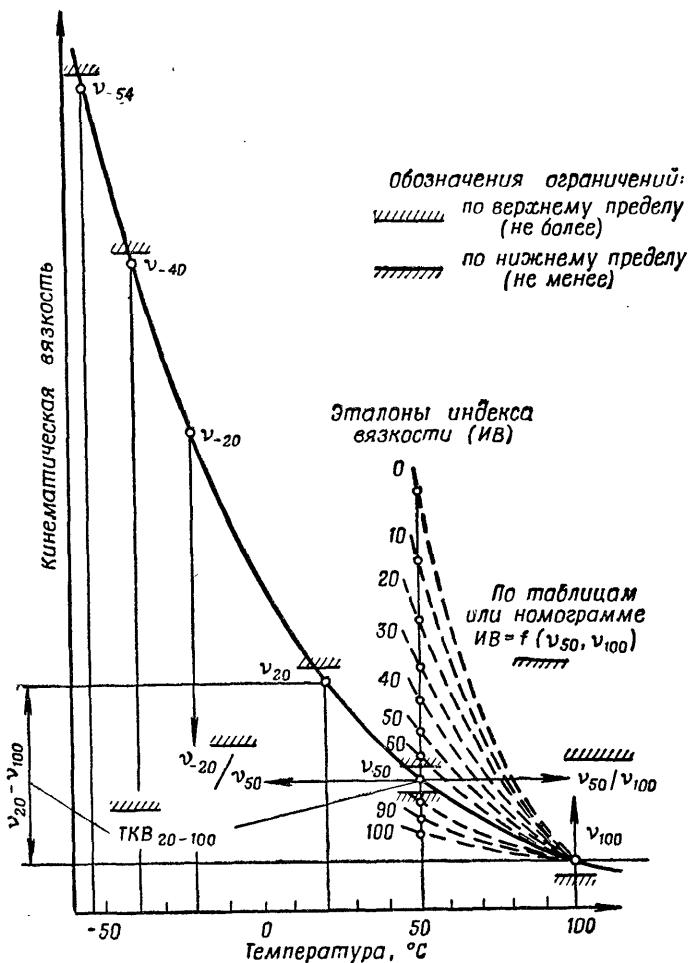


Рис. 42. Способы оценки и ограничения вязкостно-температурной характеристики масел; температурный коэффициент вязкости в пределах от 20 до 100°С $TKB_{20-100} =$
 $= 1,25 \frac{v_{20} - v_{100}}{v_{50}}$

до которой возможен запуск от стартера, в зависимости от типа двигателя обычно считается 2000—5000 сст; более точное ее значение зависит от конструкции двигателя и мощности стартера. Соответствующая этой вязкости температура может быть найдена для каждого масла по его вязкостно-температу-

турной характеристике (например, по кривым, приведенным на рис. 47).

Прекращение циркуляции масла в системе происходит при вязкости порядка 20 000 сст. Но заметное уменьшение подачи масла к ответственным узлам трения авиационных двигателей, а также существенное ухудшение разбрывания и распределения масла внутри узлов трения обычно происходят при достижении вязкости порядка 5000 сст — не намного большей, чем предельная вязкость раскрутки ротора. Поэтому значительное увеличение мощности стартера не может рассматриваться как средство преодоления плохих пусковых свойств масла: результатом его может быть выход из строя узлов трения. На двигателях, ротор которых соединяется с турбостартером с помощью гидромуфты, при вязкости в несколько тысяч сантистоксов ухудшается заполнение гидромуфты маслом, что приводит к вялой раскрутке ротора [1, 37, 59, 70].

Особые свойства на переходных режимах

Имеется переходная область вязкости и соответственно температуры масла при запуске, в которой движение масла вызывает снижение его вязкости, что облегчает выход двигателя на режим после начала вращения. Это объясняется структурными изменениями в масле при изменении его температуры. С понижением температуры ослабляется беспорядочное тепловое движение молекул жидкости, непрерывно разрывающее межмолекулярные связи. Связи стабилизируются, образуются все более крупные ассоциации молекул. Укрепление элементов внутренней структуры жидкости проявляется в росте ее вязкости. Однако движение такой жидкости разрушает ассоциации и ее вязкость уменьшается. Таким образом, при низких температурах вязкость масла зависит от поперечного градиента скорости $\frac{dv}{dn}$ (иногда это называют *аномалией вязкости*)¹. Еще резче эта зависимость проявляется в случае образования в масле микрочастиц твердой фазы из кристаллизующихся при низкой температуре парафиновых углеводородов. При неподвижном состоянии масла кристаллы парафинов образуют рыхлый каркас, который разрушается при внешнем силовом воздействии (прокрутке стартером, давлении от насоса [36]).

Способы улучшения пусковых свойств

Для масел одинаковой химической природы справедливо правило: *чем ниже вязкость, тем меньше она возрастает с понижением температуры*, т. е. лучше пусковые свойства масла. Однако снижение вязкости масел как средство улучшения вязкостно-температурной характеристики обычно неприемлемо из-за необходимости иметь достаточную вязкость при максимальной рабочей температуре. Хорошие вязкостно-температурные свойства присущи синтетическим маслам (за исключением фторуглеродных).

Важнейшим способом получения достаточно вязких масел, удовлетворительно работающих при низких температурах, является загущение маловязких нефтяных или синтети-

¹ Такого рода свойства вязких жидкостей называются структурно-механическими. Они особенно характерны для консистентных смазок и подробнее рассматриваются в гл. 10.

ческих масел высокомолекулярным полимером (например, полиметакрилатом, полиизобутиленом). Таким способом можно повысить вязкость масла при основной рабочей температуре до требуемого значения, сохранив логичность вязкостно-температурной характеристики, свойственную маловязкому маслу. Крупные малоподвижные молекулы полимера, которые в сотни и тысячи раз больше молекул жидкой основы, тормозят ее течение, увеличивают внутреннее трение между слоями масла, повышая уровень вязкости. При этом зависимость вязкости от температуры остается примерно той же, как для маловязкой основы (рис. 43),

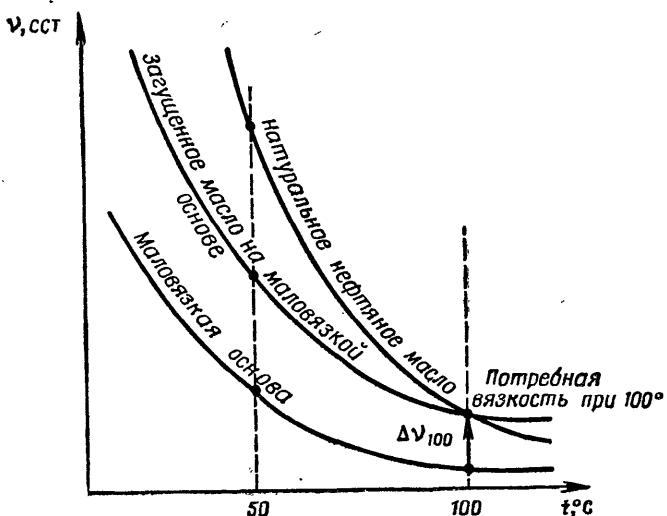


Рис. 43. Вязкостно-температурная характеристика натурального и загущенного масел (принципиальная схема)

потому что степень уменьшения поперечного сечения потока маловязкой жидкости за счет крупных молекул полимера остается практически неизменной при любой температуре. Основной недостаток загущенных масел — постепенная механическая деструкция («размол») загустителя при трении, а также термическая деструкция при высокой температуре. Деструкция присадок в значительной степени зависит от их химической природы и молекулярной массы. Поэтому большое значение имеет выбор загустителя, достаточно стойкого в условиях применения масла [42, 87].

Застывание масел

Масла не имеют четкой температуры перехода из жидкого в твердое состояние. Границей перехода условно считают температуру застывания, при которой происходит потеря подвижности масла. Застывание может быть вызвано двумя различными

процессами: постепенным повышением вязкости вплоть до превращения масла в аморфную стекловидную массу с неупорядоченным расположением молекул (не имеющую признаков кристаллического строения) или же образованием кристаллического каркаса из высокоплавких парафиновых углеводородов.

При производстве масел для обеспечения низкой температуры застывания из них стремятся удалить высокоплавкие парафины. В некоторые сорта масла вводят специальные присадки — де-прессаторы, препятствующие росту и срашиванию кристаллов парафинов. Депрессатор может снизить температуру застывания масел на 20—30°. При отсутствии или незначительном содержании парафиновых углеводородов депрессатором нельзя задержать застывание масла, обусловленное повышением вязкости. В этом случае понизить температуру застывания масла можно только путем разжижения его топливом.

Следует иметь в виду, что нижний температурный предел запуска холодного двигателя связан с вязкостно-температурной характеристикой масла; он обычно значительно выше температуры застывания. При температуре застывания и более низкой температуре практически невозможен слив масла [36, 59, 70].

ФИЗИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И ОДНОРОДНОСТЬ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Испаряемость

Испарение масел и консистентных смазок в условиях применения вызывает необратимые изменения их состава и свойств. Наиболее простой характеристикой наличия в масле легко испаряющихся фракций является температура вспышки. Она определяется в открытом тигле или в специальном приборе с закрытым тиглем, ограничивающем рассеивание паров (при этом она ниже, чем в открытом).

Более полную оценку испаряемости масел дает фракционная разгонка, но проводить ее таким способом, как для топлив, нельзя: температура кипения масляных фракций при атмосферном давлении выше температуры термического разложения некоторых веществ, входящих в состав масел. Поэтому фракционный состав масел определяют на вакуумной установке при давлении 3—4 мм рт. ст., обеспечивающем необходимое понижение температуры кипения. Другой метод основан на испарении масла при атмосферном давлении из тонкого слоя — плоскодонных алюминиевых чашечек (при подъеме температуры на каждые 20° С снимают и взвешивают по одной чашечке). Таким образом можно выявить различие фракционного состава масел, не интересуясь действительной температурой кипения их фракций (см. рис. 48) [37, 59].

Сохранение физических свойств

Чем уже фракционный состав масла, тем меньше меняются его свойства в результате испарения, тем масло физически более стабильно. Пределом является масло, выкипающее при одной постоянной температуре, свойства которого при испарении вообще не меняются. У масел широкого фракционного состава после испа-

рения легких фракций увеличивается доля тяжелых, вязких составных частей. Это резко проявляется в затруднении холодного запуска двигателя.

Испаряемость консистентных смазок оценивается по потере их веса в стандартных условиях. Она вызывает существенное изменение их эксплуатационных свойств [37].

Механические примеси и вода

Физическая однородность масел, так же как и топлив, определяется отсутствием в них механических примесей и капельно-жидкой воды. Механические примеси в масле обнаруживаются на глаз при осмотре капли, нанесенной на выпуклое стекло; при необходимости осмотр пленки масла производится через лупу или микроскоп. Качественная проверка отсутствия воды в масле производится путем подогрева масла в пробирке до температуры 150°С. Жидкая вода, переходя в парообразное состояние, обнаруживает себя по вспениванию масла и характерному потрескиванию. Аналогично определяется отсутствие жидкой воды и в консистентных смазках, которые в процессе определения расплавляются.

Появление в масле взвешенной массы мельчайших механических примесей или водной эмульсии повышает вязкость масла. Но главный ущерб от физической неоднородности состоит в нарушении непрерывности граничной смазки, абразивном и коррозионном действиях включений, а также инициирующем влиянии их на осадкообразование [59, 64].

ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНАЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Высокотемпературные химические изменения

При нагреве, обусловленном теплоподводом и трением, в маслах и консистентных смазках идут химические процессы — окисление и разложение. Они приводят к образованию твердых и мазеобразных отложений, загрязняющих двигатель или смазываемый механизм, к повышению вязкости масел, усилиению коррозионной активности. Окисление в основном происходит при температурах до 300°С в условиях контакта с кислородом воздуха или другими окислительными агентами и с катализически активными металлами, прежде всего с медью и медными сплавами. Стойкость смазочного материала к окислению при повышенных температурах называют *термоокислительной стабильностью*. При более высоких температурах (300—400°С и выше) превалируют процессы разложения — распада молекул, отщепления водорода и т. п. Стойкость смазочного материала к разложению при высоких температурах называют *термической стабильностью* [37, 58, 70].

Окисление в объеме

Глубокое окисление масла идет как в объеме, так и в тонком слое на горячих деталях; неглубокому (но, по-видимому, существенному для дальнейших процессов) окислению подвергается масляный туман в полостях двигателя. В объеме окисление происходит внутри маслобака, маслосборников и магистралей при наличии воздуха (растворенного, пробулькивающего или пены). В результате окисления образуются высокомолекулярные органические кислоты и спирты, фенолы, смолы и твердые продукты их конденсации, плохо растворимые в масле. Они выделяются в виде темного порошкообразного осадка или частиц размером 1—2 мм, которые забивают фильтры, жиклеры, масляные форсунки. Иногда в маслобаке образуются крупные куски смолы, внешне напоминающие канифоль. Интенсивное осадкообразование у нефтяных масел начинается при 120° С, у синтетических — при более высокой температуре. О термоокислительной стабильности масла при его анализе судят по количеству (в %) осадка и по кислотному числу после окисления, а в некоторых случаях по увеличению вязкости масла после испытания при 120° С или 175° С в течение 10—14 час с продувкой воздуха или кислорода при контакте с медью и сталью [37, 58, 64].

Иной характер имеет осадкообразование в маслосистеме поршневых двигателей, где возможна конденсация влаги из продуктов сгорания топлива. На поверхности мельчайших капелек воды собираются взвешенные в масле продукты окисления, частицы пыли и износа металлов. Осаждается мазеобразная щершавая масса, около половины которой составляет вода. Процесс образования такого осадка идет тем интенсивней, чем ниже температурный режим двигателя и благоприятнее условия для конденсации воды.

Окисление в тонком слое

На горячих поверхностях подшипников, поршней и других деталях легкие фракции масла испаряются. Оставшиеся тяжелые фракции превращаются сначала в смолообразные, а затем в твердые лаковые или абразивные отложения, которые состоят в основном из углерода. Лакообразование идет непрерывно, интенсивность его увеличивается с ростом температуры. Лак изменяет рабочие зазоры в узлах трения, ухудшает теплообмен, вызывает прихватывание поршневых и уплотнительных колец [58, 59, 70, 71].

При анализе масел оценку термоокислительной стабильности в тонком слое производят различными методами: по лакообразованию в пленке, стекающей по наклоненной горячей пластинке; на горячей поверхности поршня в установке, имитирующей двигатель (без подачи топлива); в алюминиевых чашечках в специальном подогревателе (лакообразователе) и др. [64]. Особый интерес представляет испытание на установке с высокооборотным подшипником качения, который создает естественную для двигателя схему контакта масла с кислородом и поверхностью металла, а также температурные вспышки и электрические явления, инициирующие окисление [66].

Влияние состава масел на окисление

В состав авиационных нефтяных масел входят главным образом циклические углеводороды, молекулы которых содержат

различное число ароматических или нафтеновых колец и боковые парафиновые цепочки. Наиболее стойки к окислению лишенные боковых цепей и малоразветвленные ароматические углеводороды. Более того, они защищают от окисления остальную часть масла. Это объясняется тем, что при их окислении образуются такие фенольные соединения, которые служат антиокислителями, обрывают цепи окислительных реакций. В связи с этим слишком глубокая очистка масла, при которой удаляются полезные ароматические углеводороды, понижает стабильность масла. Еще больший антиокислительный эффект оказывают искусственно вводимые в масло присадки фенольного характера, например ионол.

Синтетические масла отличаются, как правило, более высокой термоокислительной стабильностью, чем нефтяные. Это является главной причиной все более широкого применения синтетических масел в авиации [40, 106].

Термическая стабильность

По стойкости к разложению при высокой температуре нефтяные масла ТРД (если они защищены от окисления) не уступают синтетическим, за исключением фторуглеродных. Однако при 400° С и выше все современные смазочные материалы органического происхождения разлагаются. Нефтяные масла при этом превращаются в углистую нагароподобную массу. Некоторые синтетические масла, приготовленные на основе сложных эфиров, имеют то преимущество, что их продукты разложения летучи или полностью растворимы в масле, т. е. не опасны для двигателя.

Температура порядка 400° С действует на масло поршневых двигателей, попадающее на днище поршня. Теряя летучие вещества, масло обугливается и образует нагар. При контакте с кислородом он постепенно выгорает; слой его тем тоньше, чем выше температурный режим двигателя. Поэтому качество и расход масла при длительной работе двигателя практически не влияют на толщину нагара. Однако темп образования нагара до его стабилизации зависит от термостабильности масла.

Термостабильность некоторых масел контролируется по коксумости — углистому остатку (в %) после выпаривания и прокаливания масла в приборе с ограничением доступа воздуха. Однако сравнение масел разного состава по этому показателю не соответствует их поведению в двигателе [59, 66, 70, 106].

Стабилизация показателей

При работе масла в двигателе показатели термоокислительной стабильности и термостабильности изменяются. Резкое ухудшение всех показателей происходит в первые часы работы двигателя на свежем масле (рис. 44). Однако в дальнейшем эти изменения происходят менее резко за счет долива масла (на рис. 44 штри-

ховая линия) и за счет стабилизации масла, работающего в двигателе. Стабилизации способствует фильтрация масла, центрифugирование его внутри валов двигателя, образование антиокислителей фенольного типа и др. Некоторые показатели, как видно из рис. 44, практически стабилизируются полностью [8].

Радиационная стойкость

Одна из форм проявления стабильности масел, тесно связанная со стойкостью к окислению и разложению,— их стойкость к ядерной и космической радиации.

Воздействие потоков излучения как квантового (γ -излучение), так и корпускулярного типа (α -частицы, протоны, нейтроны и т. д.) в основном имеет энергетический характер. При их поглощении происходит частичный разрыв связей между атомами в молекулах углеводородов или отрыв от них электронов. В результате образуется множество свободных радикалов и ионов, которые кладут начало цепным процессам окисления и полимеризации. Эти процессы приводят к повышению вязкости (при очень большой дозе — вплоть до желатинизации) и кислотного числа масел. Отщепление части атомов водорода приводит к появлению высокоуглеродистых продуктов конденсации, масло темнеет. Загущенные масла сначала разжижаются из-за разрушения полимерных цепей загустителя, а затем загустевают аналогично другим маслам.

Масла, которым свойственна высокая стабильность к высокотемпературному окислению и разложению, одновременно отличаются высокой радиационной стойкостью. Существенное изменение свойств авиационных синтетических и нефтяных масел происходит при суммарной дозе поглощенного излучения более $2 \cdot 10^8$ рад. Специальные синтетические масла и смазки обладают более высокой радиационной стойкостью. Антиокислительные присадки практически не повышают радиационной стойкости: в результате взаимодействия с большим количеством активных продуктов они быстро срабатываются [32, 70].

КОРРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Содержание и действие органических кислот

Основные компоненты синтетических масел и углеводороды, составляющие основу нефтяных масел, с металлами не реагируют. Коррозионной активностью по отношению к металлам обладают органические кислоты, обычно содержащиеся в маслах и консистентных смазках в виде примеси. Частично они попадают туда из сырья, частично — образуются в процессе применения и в некоторых случаях при хранении: в нефтяных маслах — в результате окисления углеводородов, а в синтетических — при гидролизе сложных эфиров (разложении их с участием воды). В консистентных

смазках органические кислоты могут образоваться также в результате гидролиза мыльного загустителя.

Содержание органических кислот в маслах и смазках оценивают, как и в топливах, по количеству щелочи — едкого кали КОН, которое их нейтрализует. Показатель их содержания в 1 г смазочного материала называется *кислотным числом*. Для свежих нефтяных масел оно невелико — не более 0,04—0,1 мг КОН/1 г (в за-

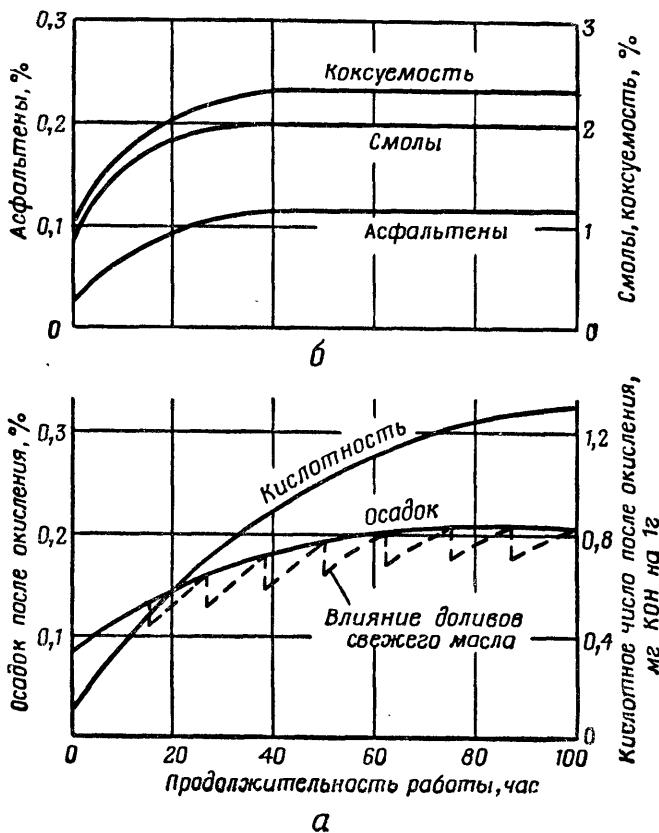


Рис. 44. Характер изменения некоторых показателей термоокислительной стабильности масел при работе двигателя (по состоянию перед очередными доливами):
а — в ТРД; б — в поршневом двигателе

висимости от сорта масла), но при работе двигателя многое зависит от возраста масла (рис. 44, а). Кислотное число свежих синтетических масел выше: диэфирных до 0,22—0,25, а полиэфирных от 4,5 до 6,0 мг КОН/1 г. Однако при работе двигателей резкого роста кислотного числа этих масел не происходит, у некоторых из них оно даже уменьшается. Возрастание кислотного числа диэфирных синтетических масел происходит при их увлажнении (они

более гигроскопичны, чем нефтяные масла). В связи с этим следует принимать меры для их защиты от проникновения атмосферной влаги. В целом коррозионная активность синтетических масел выше, чем нефтяных. В связи с этим требуется специальный подбор металлов и покрытий, стойких в этих маслах.

Коррозионное действие органических кислот в узлах трения проявляется только при повышенных температурах (более 50° С), особенно при нагреве в зоне трения. На маслах с высоким кислотным числом наблюдается своеобразный коррозионно-фрикционный точечный износ. Возможно, что возникновение питтингового износа подшипников качения связано с совместным коррозионным и механическим действием на поверхность металла. Контакт с металлом в свою очередь способствует повышению кислотности масла. Однако не существует зависимости между кислотностью свежего масла и коррозией, которую оно вызывает при работе, так как различные кислоты не одинаково активны. Поэтому оценку коррозионности масла производят по изменению веса металлических пластинок в условиях, имитирующих в той или иной степени условия применения, а кислотное число свежего масла определяют для контроля технологии его производства [37, 59].

Присадки

Для понижения активности некоторых синтетических масел по отношению к металлам используются анткоррозионные присадки, в частности меркаптобензоизазол (сераорганическое азотсодержащее соединение), которое используется также в качестве противозадирной присадки. Действие этой и большинства других анткоррозионных присадок обусловливается их собственной коррозионной активностью — способностью образовать на поверхности металла защитную пленку (следует иметь в виду, что их активное воздействие на некоторые покрытия может оказаться вредным). Анткоррозионное действие присадок обычно сочетается с антиокислительным, так как защитная пленка ограждает масло от непосредственного соприкосновения с цветными металлами — катализаторами окисления масла. Другой способ предотвращения коррозии металла — нейтрализация кислых соединений небольшим избытком щелочи, если она для данного металла безопасна. Этот способ используется для улучшения защитных свойств консистентных смазок, а также некоторых сортов масел наземной техники [37, 59].

Действие серы

Соединения серы, содержащиеся в маслах для двигателей, при обычной рабочей температуре не активны и коррозии не вызывают. Они проявляют себя только на тяжелых режимах трения, когда коррозионное действие масла играет поло-

жительную роль (предотвращает задир и сваривание). В некоторых сильно нагруженных редукторных и червячных механизмах специально применяют коррозионноактивные масла, так как опасность коррозионного износа таких механизмов меньше, чем опасность задира. Масла для них содержат высокую концентрацию органических кислот, соединений серы (некоторые масла имеют даже свободную серу) [67, 70].

Действие масла на резину и уплотнительные материалы

Применяемые в маслосистемах резинотехнические и другие неметаллические детали выполняются из специальных материалов, устойчивых при контакте с предназначенными для них сортами масел. Немаслостойкие сорта резины, паронита и других неметаллических материалов разрушаются вследствие химической и физической (растворяющей) активности не примесей, а самой основы масла по отношению к этим материалам. Они постепенно набухают, или происходит их усадка, уменьшение прочности, потеря эластичности, появление хрупкости, трещин. Масло при этом загрязняется продуктами взаимодействия с резиной, частицами разрушившихся уплотнений. Интенсивность действия масел на резину возрастает с повышением температуры. В составе нефтяных масел самыми агрессивными по отношению к резине и парониту являются ароматические углеводороды, затем идут нафтины; наиболее пассивны парафиновые углеводороды. В связи с этим для ряда авиационных масел установлена норма по нижнему пределу *анилиновой точки* (температуре расслоения масла с анилином: чем она выше, тем меньше ароматических углеводородов в масле). Применяемые в авиационных двигателях марки резины 4410, 9831 и другие практически устойчивы при использовании стандартных нефтяных масел. Синтетические масла, как правило, отличаются более агрессивным действием на резину и требуют применения специальных устойчивых к ним составов резины. В частности, в условиях контакта с диэфирным маслом не разрушается резина марки 3825 [37].

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Факторы, зависящие от смазки

Качество смазочного материала в той или иной степени влияет на работоспособность двигателей и других смазываемых механизмов и узлов летательных аппаратов. Прежде всего от него зависит их надежность в течение установленного срока службы, а также легкость запуска двигателя и быстрота его выхода на режим (или сопротивление сдвигу в других устройствах). При любых эксплуатационных условиях смазочный материал должен создавать надежную пролойку между трущимися поверхностями.

стями, которая уменьшала бы трение и износ. В тех узлах трения, конструкция и условия работы которых рассчитаны на гидродинамическую смазку, смазочный материал должен обеспечивать образование непрерывного жидкостного слоя, не вытекать слишком быстро или не выбрасываться из зазоров. Одновременно он не должен создавать больших усилий внутреннего трения, требующих значительной затраты мощности. В узлах с граничной смазкой (участки контакта при качении и зацеплении), а также при кратковременных нарушениях гидродинамической смазки смазочный материал должен прочно прилипать к трущимся поверхностям (адсорбироваться на них) и защищать их от износа. В случае разрушения адсорбированной пленки он должен вступать в химическую реакцию с поверхностью металла, предотвращая задир и сваривание.

Весьма важно, чтобы смазочный материал при длительной работе в условиях высокой температуры, а также при радиационном воздействии сохранял свой состав и свойства, не давал отложений, способствующих перегреву деталей и загрязняющих двигатель (или другой механизм), не вызывал коррозии материалов. Масло при любых эксплуатационных условиях должно хорошо прокачиваться через маслосистему и разбрызгиваться в зоне, нуждающейся в смазке, куда оно не поступает под давлением. Одно из существенных требований к смазочным материалам, потребляемым в большом количестве,— наличие сырьевой и производственной базы и невысокая стоимость производства [59, 70].

Требования к свойствам

Исходя из общих требований желательны следующие свойства смазочных материалов:

- хорошая смазывающая способность;
- возможно меньшая вязкость, но достаточная для создания надежного жидкостного слоя в узлах с гидродинамической смазкой при максимальной рабочей температуре (не ниже заданной величины при температуре 50 и 100°С или какой-либо другой);
- пологая вязкостно-температурная характеристика;
- резкое возрастание вязкости с повышением давления;
- антизадирные свойства при высоких нагрузках;
- отсутствие нестабильных составных частей, выделяющихся в виде загрязняющих отложений;
- отсутствие или безопасное количество коррозионноактивных веществ и составных частей, склонных к превращениям в коррозионноактивные вещества;
- низкая температура застывания (затвердевания);
- высокая температура вспышки жидких масел (характеризующая стойкость против испарения);
- узкий фракционный состав жидких масел;

- физическая однородность (отсутствие механических примесей, воды, склонности к пенообразованию);
- минимальная гигроскопичность;
- радиационная стойкость;
- отсутствие токсичных веществ [59, 70, 81].

О реализации требований

Смазочные материалы, обладающие всем комплексом желательных свойств, получить практически невозможно, так как многие требования, предъявляемые к ним, противоречат друг другу. Подбор свойств смазочных материалов еще в большей степени является компромиссным, чем подбор свойств топлив. Так, ароматические углеводороды обеспечивают высокую термоокислительную стабильность нефтяных масел, но ухудшают вязкостно-температурную характеристику и повышают агрессивность к резине. Парабиновые углеводороды с пологой вязкостно-температурной характеристикой имеют высокую температуру застывания. Естественные носители смазывающей способности (органические кислоты, смолы, соединения серы) ухудшают термостабильность и повышают коррозионную активность в отношении металлов. Синтетические масла, обладающие рядом ценных качеств, коррозионноактивны и ядовиты. В связи с этим к каждому сорту масла предъявляются высокие требования по тем показателям, которые являются решающими, а по остальным устанавливаются менее жесткие требования.

Некоторые свойства масла при его повседневном применении контролировать сложно (например, смазывающую способность, стабильность, коррозионные свойства). Для суждения об этих свойствах пользуются косвенными признаками — значениями плотности, зольности, коксуемости, кислотного числа, температуры вспышки и др. Если по всему комплексу этих показателей масло находится в пределах норм, т. е. соответствует образцу, успешно прошедшему государственные испытания (по данным которого установлены нормы), считается, что масло соответствует ему по химическому составу и, следовательно, по смазывающей способности, по стабильности и коррозионным свойствам [59, 81].

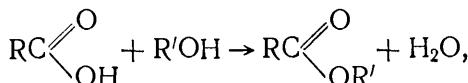
Г л а в а 7

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОИЗВОДСТВЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

ПОЛУЧЕНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАСЕЛ И ЖИДКОСТЕЙ

Сложные эфиры

Авиационные синтетические масла приготовлены на основе сложных эфиров — продуктов взаимодействия карбоновых кислот со спиртами. Схема реакции *этерификации* (образования сложного эфира) — замещение водородного атома карбоксильной группы COOH в молекуле кислоты на углеводородный радикал спирта R'.



где R — углеводородный радикал кислоты.

Для получения масел используются одно- и двухосновные высокомолекулярные кислоты RCOOH и R(COOH)₂ и высокомолекулярные спирты с различным числом гидроксильных групп ROH, R(OH)₂, R(OH)₃, R(OH)₄. Их вырабатывают из нефтепродуктов в основном путем окисления непредельных углеводородов, а также из растительного сырья.

Наиболее характерными являются следующие каталитические процессы этерификации, идущие при температуре 140—225° С и атмосферном давлении:

— получение *диэфира* (диоктилсебацината) путем взаимодействия себациновой кислоты C₈H₁₆(COOH)₂, вырабатываемой из растительного касторового масла, с изооктиловым (2-этилгексиловым) спиртом C₈H₁₇OH;

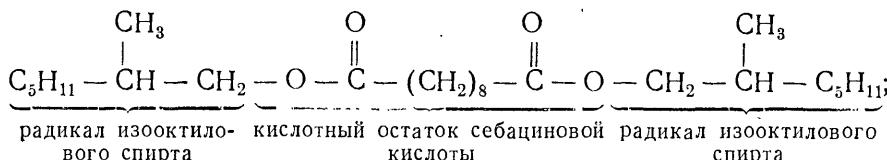
— получение *гликолевого* эфира путем взаимодействия синтетических жирных кислот C₅H₁₁COOH, C₆H₁₃COOH и других с двумя атомами спиртом — этиленгликолем C₂H₄(OH)₂;

— получение *пентаэритритового* эфира путем последовательного взаимодействия синтетических жирных кислот C₅H₁₁COOH, C₆H₁₃COOH и других сначала с метиловым спиртом CH₃OH

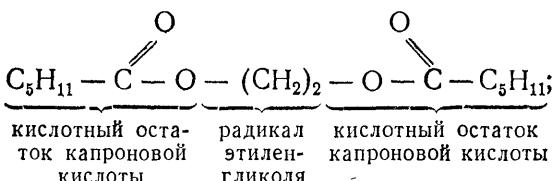
(первичная этерификация), затем с четырехатомным спиртом — пентаэритритом $C_5H_8(OH)_4$.

В качестве катализатора используются ионообменные смолы или окись цинка. Получаемые при этих процессах сложные эфиры имеют следующую структуру молекул:

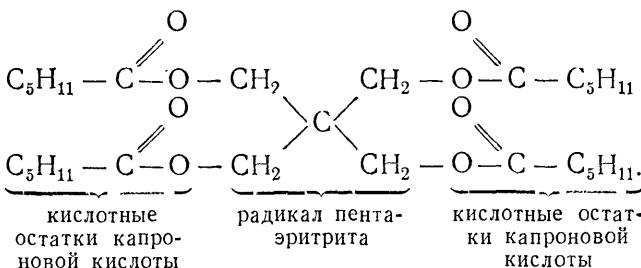
а) диоктилсебацинат:



б) диэтиленгликоловый эфир капроновой кислоты:



в) пентаэритритовый эфир капроновой кислоты:



Аналогичным образом могут быть получены сложные эфиры на базе других кислот и спиртов [59, 70, 71].

Галогенпроизводные углеводородов

Фторуглеродные масла и жидкости, представляющие собой продукты полного фторирования углеводородов (перфторугле-

роды) $F-C(F)-C(F)-\dots-C(F)-F$ имеют значительно более высокую молекулярную массу и более высокую вязкость, чем исходные углеводороды. Поэтому фторуглеродные маловязкие масла получают

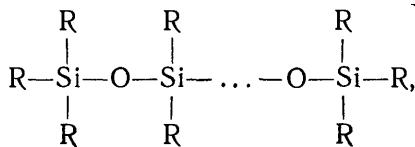
фторированием маловязких нефтяных фракций — керосиновой и бензиновой, а масла повышенной вязкости — фторированием маловязких масляных фракций.

Хлорфторуглеродные масла вырабатывают полимеризацией хлортрифтотретилена: $n(F_2C=CFCl) \rightarrow (F_2CFCl)_n$. Последний получают двумя этапами: сначала хлорируется и фторируется метан, а затем производится его пиролиз (частичное разрушение структуры молекул под действием высокой температуры), который сопровождается образованием непредельных молекул $(C_2C_1F_3)_n$.

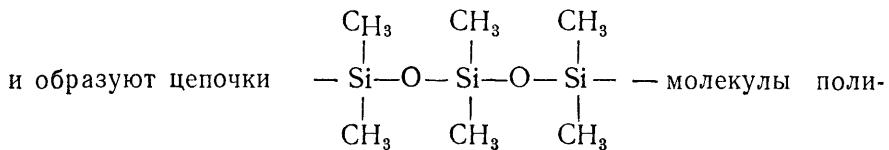
Фреоны — низкомолекулярные хлор- и бромфторпроизводные углеводородов, которые используются в качестве хладоагентов и огнегасительных жидкостей (например, тетрафтордигромэтан — фреон 114Br), получаются хлорированием и бромированием углеводородов (метана, этана, этилена), а затем взаимодействием их с фторидами металлов [59, 70].

Кремнийорганические масла и жидкости

Полисилоксаны со структурой молекулы



в скелете которой чередуются атомы кремния и кислорода (R — углеводородные радикалы, например CH_3 или C_2H_5), вырабатываются в конечном счете из кварцевого песка, воды и углеводородных газов. Восстановлением кремнезема SiO_2 получается чистый кремний, который обрабатывается хлорпроизводными углеводородов, например хлорметаном CH_3Cl . Продукты их соединения, например диметилдихлорислан $(CH_3)_2SiCl_2$, реагируя с водой, отщепляют хлористый водород HCl



силоксана (в данном примере полиметилсилоксан). Длина цепей и их структура зависят от состава промежуточных продуктов — хлорпроизводных, от условий ведения процессов и катализаторов [59, 70, 71].

ПРОИЗВОДСТВО НЕФТЯНЫХ МАСЕЛ

Вакуумная перегонка мазута

Исходным продуктом в производстве нефтяных смазочных масел служит мазут — остаток от перегонки нефти, состоящий из высококипящих углеводородов. Его нагревают до 350—375° С и в вакуумной ректификационной колонне при остаточном давлении 40—50 мм рт. ст. разделяют на фракции. Для ускорения процесса в колонну вводят перегретый водяной пар: углеводороды испаряются по огромной поверхности внутри пробулькивающих пузырьков водяного пара.

Из верхней части колонны отбирается соляровый дистиллят, который идет на химическую переработку и частично на приготовление дизельного топлива и загущаемых масел, ниже — масляные дистилляты, из которых приготавляются масла для ТРД, приборное масло МВП, трансформаторное масло, из средней части колонны — более вязкие дистилляты различных индустриальных масел, автолов и др. В случае полного отгона из мазута всех масляных фракций в нижней части колонны остается гудрон; если же отгоняются только маловязкие фракции, то неперегнанный остаток (полугудрон) — смесь вязких углеводородов с асфальто-смолистыми веществами — идет на приготовление масел для авиационных поршневых двигателей и трансмиссионных масел. Соответственно нефтяные масла принято делить на *дистиллятные* и *остаточные*; последние отличаются высокой смазывающей способностью [59, 72, 89].

Очистка

Для удаления из масляных дистиллятов и остатка нежелательных примесей асфальто-смолистых веществ, органических кислот и других их подвергают очистке. Простейшая кислотно-щелочная очистка применяется при производстве трансформаторного и других технических масел. Она заключается в обработке дистиллята крепкой серной кислотой (96—98%), а затем щелочью. Асфальто-смолистые вещества, часть нафтеновых кислот и тяжелые ароматические углеводороды, склонные к обугливанию при высокой температуре, легко вступают в реакцию с серной кислотой и удаляются из масла. Затем кислое масло обрабатывают натриевой щелочью (каустической содой), которая нейтрализует органические кислоты и остатки серной кислоты. Для удаления остатка щелочи и солей масло промывают водой и просушивают нагретым воздухом.

При производстве ряда авиационных масел используется кислотно-контактная (кислотно-земельная) очистка. Она заключается в обработке дистиллята или остатка серной кислотой, а затем отбеливающей землей (измельченной в порошок глиной). При контакте с горячим кислым маслом она адсорбирует на своей

огромной поверхности асфальто-смолистые вещества и отбросы сернокислотной очистки. После этого продукт пропускают под давлением через фильтры для удаления глины. Очищенные этим способом авиационные масла маркируются буквами МК.

Селективная очистка, также применяемая в производстве авиационных масел, производится с помощью растворителей, одни из которых растворяют только неуглеводородные примеси, содержащиеся в дистилляте или остатке, другие, наоборот, растворяют только углеводороды. Образуется два слоя: тяжелый экстракт — растворитель с находящимися в нем вредными веществами, удаляемыми из масла, и более легкий — рафинированное (очищенное) масло с примесью второго растворителя. Их разделяют и отгоняют от них растворители, чтобы использовать вновь. Авиационные масла, очищенные этим способом, маркируются буквами МС.

Следует отметить, что понятие о «вредных» и «полезных» составных частях масла в некоторой мере условно. Так, смолистые вещества, склонные к образованию углеродистых отложений и считающиеся поэтому вредными, одновременно являются носителями смазывающей способности масла. Масла, подвергнутые слишком глубокой селективной очистке («переочищенные»), не прилипают к деталям; результатом этого могут быть повышенный износ и разрушение узлов трения. Высоковязкая, липкая смолистая смесь (смолка), получаемая после отгона селективного растворителя от экстракта, является прекрасным компонентом для трансмиссионных масел, работающих в условиях высоких динамических нагрузок при сравнительно низкой температуре.

Если в масляной фракции много асфальто-углеродистых веществ, то для их удаления требуется большой расход серной кислоты, селективных растворителей и т. д. В таких случаях производится предварительная деасфальтизация масляного полу-продукта: его растворяют в легком бензине или жидком пропане. Малорастворимые в них асфальто-углеродистые и смолистые вещества выпадают; после их удаления растворитель отгоняют от масла [35, 59, 62, 72].

Депарафинизация

Для получения масел с низкой температурой застывания очистку завершают удалением высокоплавких парафиновых углеводородов. Масло растворяют в лигроине или жидком пропане, или в каком-либо другом низкозамерзающем растворителе. Раствор охлаждают до температуры минус 25—40°С и подают на высокооборотные центрифуги, где застывшие углеводороды под действием центробежных сил отделяются от масла. Смесь твердых парафинов с некоторым количеством жидкого масла и примесей называется петролатумом, из него получают твердый белый парфин и церезин (темную смесь разнообразных твердых

углеводородов). Все три продукта используются для приготовления предохранительных консистентных смазок. В последнее время вместо дорогой и сложной депарафинизации охлаждением внедряется карбамидная очистка, аналогичная соответствующей очистке топлива [59].

ПОЛУЧЕНИЕ ПРИСАДОК

Вязкостные присадки

Загустители для приготовления масел и технических жидкостей на маловязкой основе получают путем каталитической полимеризации. Полиизобутилен получается полимеризацией газообразного непредельного углеводорода изобутилена, который выделяется из газов переработки нефти: $nC_4H_8 \rightarrow (C_4H_8)_n$. Вырабатывают полизобутилен каучукообразной консистенции со средней молекулярной массой около 20 000, обладающий высокой загущающей способностью, но недостаточно стойкий против деполимеризации, и более стойкий октол-600, который представляет собой вязкую жидкость ($\nu_{100} \approx 600 \text{ cst}$). Полиметакрилаты вырабатываются путем этерификации непредельной метакриловой кислоты C_4H_7COOH (ее получают из ацетона и синильной кислоты) смесью высокомолекулярных спиртов $C_{12}H_{25}OH - C_{18}H_{37}OH$. Полученный сложный эфир подвергается полимеризации. Винилополи($C_2H_3OC_4H_9)_n$ (полимер винили-*n*-бутилового эфира) синтезируется из ацетилена C_2H_2 и нормального бутилового спирта C_4H_9OH с участием уксусной кислоты [42, 59, 70].

Антиокислительные и антикоррозионные присадки

Антиокислительным действием обладают главным образом фенольные соединения. Фенол C_6H_5OH и аналогичное бициклическое соединение нафтол $C_{10}H_7OH$ получают из сульфокислот, образующихся при сернокислотной очистке масел и топлив, а также выделяют из каменноугольной смолы. Их производные получаются алкилированием (присоединением алкильных групп C_nH_{2n-1}), обработкой аминами и т. д. Таким образом, вырабатываются следующие присадки (при обычной температуре твердые вещества): дигидробутилкрезол (ДБК-69, ионол, топанол «О») $CH_3C_6H_2OH$ ($C_4H_9)_2$, дифениламин ($C_6H_5)_2NH$, параоксидифениламин $C_6H_5NHC_6H_5OH$, фенил- α -нафтиламин $C_6H_5NHC_{10}H_7$.

Анткоррозионное действие оказывают гетероциклические аминопроизводные серусодержащие соединения — фенотиазин (тиодифениламин) $C_6H_4\left(\begin{array}{c} S \\ | \\ NH \end{array}\right)C_6H_4$ и меркаптобензотиазол $C_6H_4\left(\begin{array}{c} S \\ || \\ N \end{array}\right)CSH$ [37, 59, 70].

Антиизносные и антизадирные присадки

Решающую роль в антиизносном и антизадирном действии присадок играют вводимые в состав органических молекул фосфор, сера и хлор. Трикрезилфосфат и трифенилфосфат образуются из фосфорной кислоты и соответственно крезола или фенола; они имеют структуру сложных эфиров $(CH_3C_6H_4)_3PO_4$ и $(C_6H_5)_3PO_4$. Солов получается хлорированием бензола и представляет собой смесь пентахлоридфенила C_6HCl_5 и тетрахлоридфенила $C_6H_2Cl_4$. Осерненный октол получается путем добавки 1—2% серы в процессе полимеризации изобутилена, в результате чего в полизобутилене образуется примесь сульфидов типа $R-S_n-R'$ (где R и R' — алкильные радикалы). К числу присадок этого типа относится также меркаптобензотиазол [59, 67, 70].

ПРОИЗВОДСТВО КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОК

Приготовление мыльных смазок

Консистентные смазки обычно изготавливаются путем загущения нефтяных или синтетических масел мылами или твердыми углеводородами (для некоторых смазок используются и другие загустители). Основной тип загустителей — мыла — представляют собой соединения, получаемые в результате взаимодействия металлов с высокомолекулярными жирными кислотами (стеариновой и другими). Наиболее распространенные смазки на литиевых, натриевых и кальциевых мылах получают в варочных аппаратах путем прямого омыления жирных кислот или жиров соответствующей щелочью — раствором гидроокиси лития LiOH , едкого натра NaOH , известковым молоком $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Для лучшего диспергирования мыла в варочный аппарат сразу вводится часть масла. Омыление ведется при температуре 80—90° С несколько часов. Затем добавляется остальное количество масла; в случае изготовления литиевых и натриевых смазок температуру повышают примерно до 200° С. Подогрев производится до тех пор, пока мыло полностью не разойдется в масле. Охлаждение смазки ведется по определенному режиму, от него зависит структура мыльного скелета и качество смазки.

Цинковые, алюминиевые и ряд других смазок изготавливают на готовых мылах: в варочный аппарат в масло, разогретое до температуры 150—210° С (в зависимости от типа смазки), загружается заранее приготовленное мыло. В результате перемешивания мельчайшие частицы мыла расходятся в масле, а при охлаждении образуют структурный скелет, в ячейках которого удерживается масло [17, 59].

Получение углеводородных смазок

Смазки, не содержащие мыл, — пушечную, вазелин и некоторые другие — непосредственно получают из мазута при производстве масел или приготавливают путем растворения в масле углеводородов (парафина, церезина).

Некоторые сорта смазок после охлаждения подвергают механической гомогенизации (выравниванию микроструктуры) на перетирочной машине. Процесс приготовления смазки при атмосферном давлении длится от 10—12 час до нескольких суток. В автоклавах при давлении 5—8 атмосфер время получения некоторых смазок значительно сокращается [59].

ПРОИЗВОДСТВО ЭТИЛОВОГО СПИРТА

Спирт из растительного сырья

Растительным сырьем для выработки этилового спирта являются пищевые продукты (зерно, картофель, свекольно-сахарная патока), древесина и растительные отходы, отходы сульфитной

варки целлюлозы (сульфитный щелок). Спирт образуется в результате брожения сахаристых веществ. Их получают переработкой крахмала, содержащегося в пищевом сырье, или гидролизом растительной клетчатки. Из пищевого сырья непосредственно вырабатывают 88% спирт-сырец, а при гидролизе или сульфитной варке целлюлозы — 94—95% технический спирт (гидролизный или сульфитный). Путем перегонки от них отделяют примеси и получают 95,5% ректифицированный спирт.

Затраты исходных продуктов на 1 т пищевого спирта — около 4,5 т зерна или 14 т картофеля. Производство пищевого спирта в последние годы сокращено. Гидролизный спирт двухкратной ректификации по качеству не уступает пищевому [59, 72].

Синтетический спирт

Во все больших масштабах этиловый спирт получают синтетическим путем из этилена, который выделяется из смеси крекинг-газов нефтепереработки. Он в 2—2,5 раза дешевле, чем спирт из растительного сырья, однако из-за наличия трудно удаляемых примесей качество его ниже. Спирт получается прямой гидратацией этилена $C_2H_4 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH$, которая идет при температуре 250°С и давлении 60—100 атмосфер с катализатором, или косвенной гидратацией (получают этиловые эфиры серной кислоты и подвергают их гидролизу) [59, 72].

Глава 8

МАСЛА ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

УСЛОВИЯ РАБОТЫ МАСЛА В ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ И ТРЕБОВАНИЯ К МАСЛАМ ДЛЯ НИХ

Система смазки

Типичная для современных ТРД система смазки — циркуляционная незамкнутая, в которой масло забирается из маслобака и после каждого цикла циркуляции поступает обратно в бак (рис. 45). Нагнетающим насосом масло подается через фильтр тонкой очистки по магистралям высокого давления (на рис. 45 выделены жирными линиями) к объектам смазки. Главными из них являются подшипники качения опор компрессора и турбины, работающие с числом оборотов порядка 6000—12 000 об/мин. Масло поступает к подшипникам через трех-четырехструйные форсунки в зазор между кольцом и сепаратором, интенсивно дробится, покрывает поверхность тел качения, колец и сепараторов, омывает внешнюю поверхность подшипников и, сильно вспененное, стекает в маслосборники. Оттуда оно засасывается откачивающими насосами. Чтобы в откачивающих магистралях (на рис. 45 жирные штриховые линии) не возникала кавитация, в масляных полостях создается избыточное давление (порядка 0,1—0,3 избыточной атмосферы). Сжатый воздух просачивается туда извне через уплотнения масляных полостей, препятствуя тем самым утечке масла.

Откачивающие насосы прогоняют масло через центробежный газоотделитель, в основном разрушающий пену, а затем через радиатор в маслобак, который на сверхзвуковых самолетах охлаждается топливом, а на дозвуковых — воздухом. Маслобак и все масляные полости, в которые попадает воздух, в том числе полость центробежного газоотделителя, соединены магистралями суживания (на рис. 45 светлые) с центробежным суфлером и через него имеют выход в атмосферу. Суфлер отделяет большую часть взвешенного в воздухе масла и возвращает его в маслосистему.

Типичные данные по прокачке масла и температурным условиям в различных участках системы смазки приведены на рис. 45.

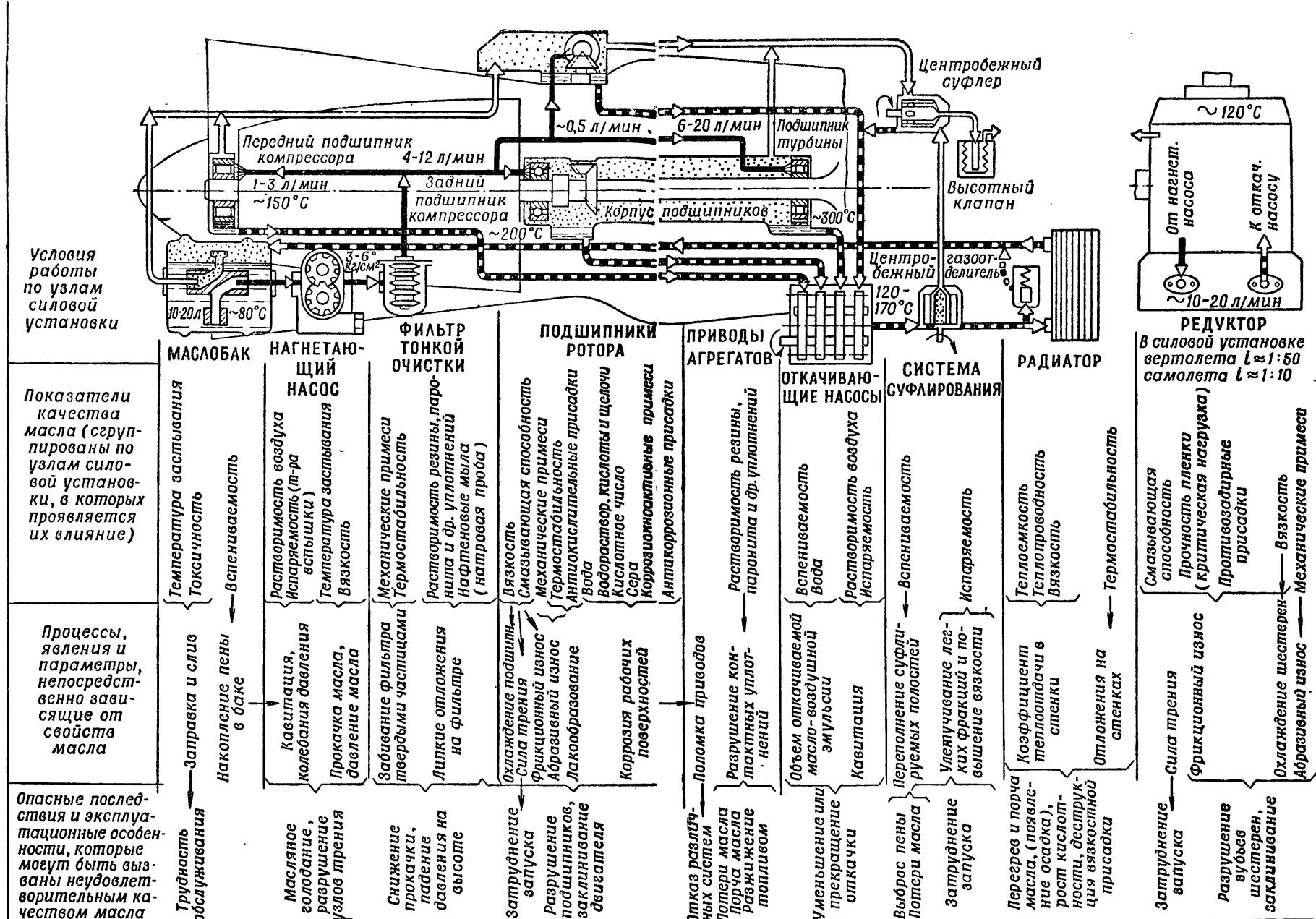


Рис. 45. Свойства смазочного масла, влияющие на эксплуатационную надежность газотурбинной силовой установки

Нормальная работа ТРД обеспечивается небольшим количеством масла (10—25 л), интенсивно циркулирующего в системе (50—130 раз в час, т. е. продолжительность одного цикла 0,5—1 мин). Температура масла (в объеме) из-за разнообразия условий эксплуатации может колебаться в значительных пределах от минус 30—60° С до плюс 130—150° С и выше. В связи с этим необходима

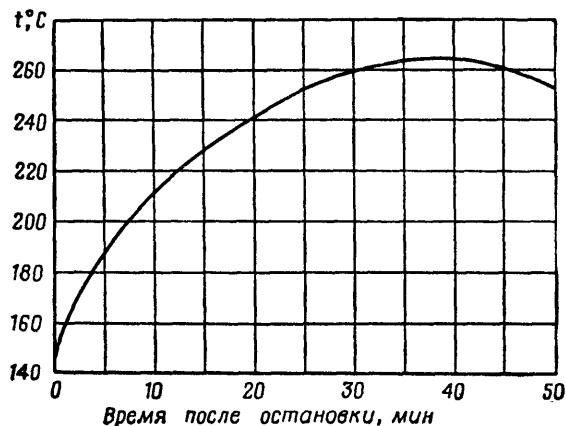


Рис. 46. Изменение температуры внешней обоймы подшипника турбины после остановки двигателя

пологая вязкостно-температурная характеристика масла, низкая температура его застывания. Подшипники компрессора при работе нагреваются приблизительно до 120—200° С, подшипник турбины до 250—300° С, а после остановки двигателя из-за прекращения циркуляции масла и внешнего обдува корпуса подшипников — значительно выше (динамика нагрева подшипника турбины показана на рис. 46; приведенная на нем относительно невысокая температура кольца соответствует дозвуковому двигателю). Нагрев подшипников способствует испарению масла и создает условия для окисления, осадко- и лакообразования. Из этого вытекают требования низкой испаряемости и высокой термоокислительной и термической стабильности.

Кроме смазки подшипников ротора масло обеспечивает смазку шестеренчатых передач приводов агрегатов, работающих при невысоких нагрузках. К некоторым из них масло подается также струйными форсунками, остальные смазываются образующимся в коробке приводов масляным туманом [31, 59, 71].

Узлы трения

В подшипниках ротора контактные напряжения достигают 20 000—30 000 kg/cm^2 . Они воспринимаются граничной пленкой

масла. Оно должно обладать достаточной смазывающей способностью, чтобы в течение нескольких микросекунд, которыми измеряется продолжительность контакта тел качения с кольцами в каждой точке, пленка не разрушалась. На участках с меньшей нагрузкой (у бортиков колец и гнезд сепараторов) обычно происходит жидкостное трение. Ввиду больших скоростей для его обеспечения не требуется высокой вязкости масла, а с точки зрения подачи к подшипникам и их охлаждения безусловно желательно маловязкое масло [30, 92, 112].

Воздействие на систему смазки

Масло при работе ТРД соприкасается с каталитически активными медными сплавами (бронзовые или латунные сепараторы подшипников), с коррозионно нестойкими свинцовыми и другими покрытиями, с частично растворимыми или набухающими уплотнительными материалами (резина, паронит). Чем маслонейтральнее по отношению к ним, тем больше срок службы и двигателя, и самого масла. В ТРД масло не имеет непосредственного контакта с продуктами сгорания топлива и с жидким топливом (разумеется, при исправном состоянии топливно-масляных радиаторов и уплотнений привода топливных насосов).

Свойства масла, которые могут влиять на эксплуатационную надежность ТРД, сгруппированы на рис. 45 по узлам, в которых проявляется это влияние; указаны зависящие от свойств масла процессы и явления, связанные с ними особенности эксплуатации и возможные опасные последствия неудовлетворительного качества масла [37, 71, 91, 112].

СИНТЕТИЧЕСКИЕ МАСЛА ДЛЯ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Эксплуатационные свойства современных сортов

На высокотемпературных ТРД сверхзвуковых самолетов в качестве основных сортов применяют синтетические *диэфирные* и *полиэфирные* масла с антиокислительными и антиизносными присадками. Эти масла значительно лучше нефтяных по вязкостно-температурной характеристике и низкотемпературным свойствам, по смазывающей способности и, что особенно важно, они термостабильны и практически не испаряются даже в условиях наиболее теплонапряженных современных двигателей, благодаря чему их можно использовать без замены в течение полного ресурса двигателя. Масло ВНИИ НП-50-1-4Ф работоспособно примерно до 175° С; при более высокой температуре оно недостаточно стабильно в тонком слое. Масло 36/1 работоспособно до еще более высокой температуры, порядка 200° С, а кратковременно — даже до 250° С.

Молекулы ди- и полиэфирных масел содержат по две или несколько полярных групп $-\text{C}(=\text{O})\text{O}-$, что обеспечивает их ориентацию у поверхности металла и образование адсорбированной смазочной пленки из самой основы масла (в отличие от нефтяных масел, где носителями смазывающей способности являются примеси кислот, смол и др.). Это оказывается существенным при высокой рабочей температуре подшипников, когда граничная пленка, образуемая очищенным нефтяным маслом, разрушается при действующих в них нагрузках. Прочность граничной пленки синтетических масел, оцениваемая по критической нагрузке ее разрушения, примерно в два раза выше по сравнению с прочностью пленки применяемых в ТРД нефтяных масел.

Вязкость масла ВНИИ НП-50-1-4Ф при 100°C не менее 3,2 сст, а масла 36/1 несколько выше, не менее 3,5 сст. Вязкостно-температурная характеристика обоих масел достаточно пологая (рис. 47), температура застывания ниже -60°C . Если считать возможной прокрутку ТРД стартером обычной мощности до максимальной вязкости масел 3 000—4 000 сст, то они способны обеспечить запуск до минус 40 — 50°C без предварительного подогрева. Изменение вязкости и низкотемпературных свойств после длительной работы масел незначительно, если не был повышен температурный предел их работоспособности.

Расход синтетических масел благодаря их низкой испаримости в несколько раз меньше, чем нефтяных. Из данных, приведенных на рис. 48 (справа), видно, что испарение диэфирного масла в тонком слое практически начинается при такой температуре, при которой нефтяные масла, близкие ему по вязкости в рабочем диапазоне температур, испаряются почти полностью.

Существенный недостаток синтетических масел заключается в набухании соприкасающихся с ними резиновых шлангов и уплотнений из обычных сортов каучука. Для изготовления резиновых деталей маслосистемы необходимы особые его сорта. Некоторые покрытия из цветных металлов, выдерживающие контакт с нефтяным маслом, под воздействием синтетических масел разрушаются; поэтому на двигателях, рассчитанных на использование синтетических масел, покрытия делаются только из совместимых с ними материалов. Длительное действие синтетического масла может повредить изоляцию электропроводки и другие элементы внешней обвязки двигателя, в связи с чем их покрывают маслостойкими лаками и тщательно следят за чистотой внешних поверхностей двигателей [1, 37, 59, 65, 71, 96, 105].

Действие присадок

Противоизносная присадка (трикрезилфосфат или меркапто-бензотиазол) обеспечивает быструю приработку узлов трения на синтетическом масле, снижает их износ, а при отклонениях от норм

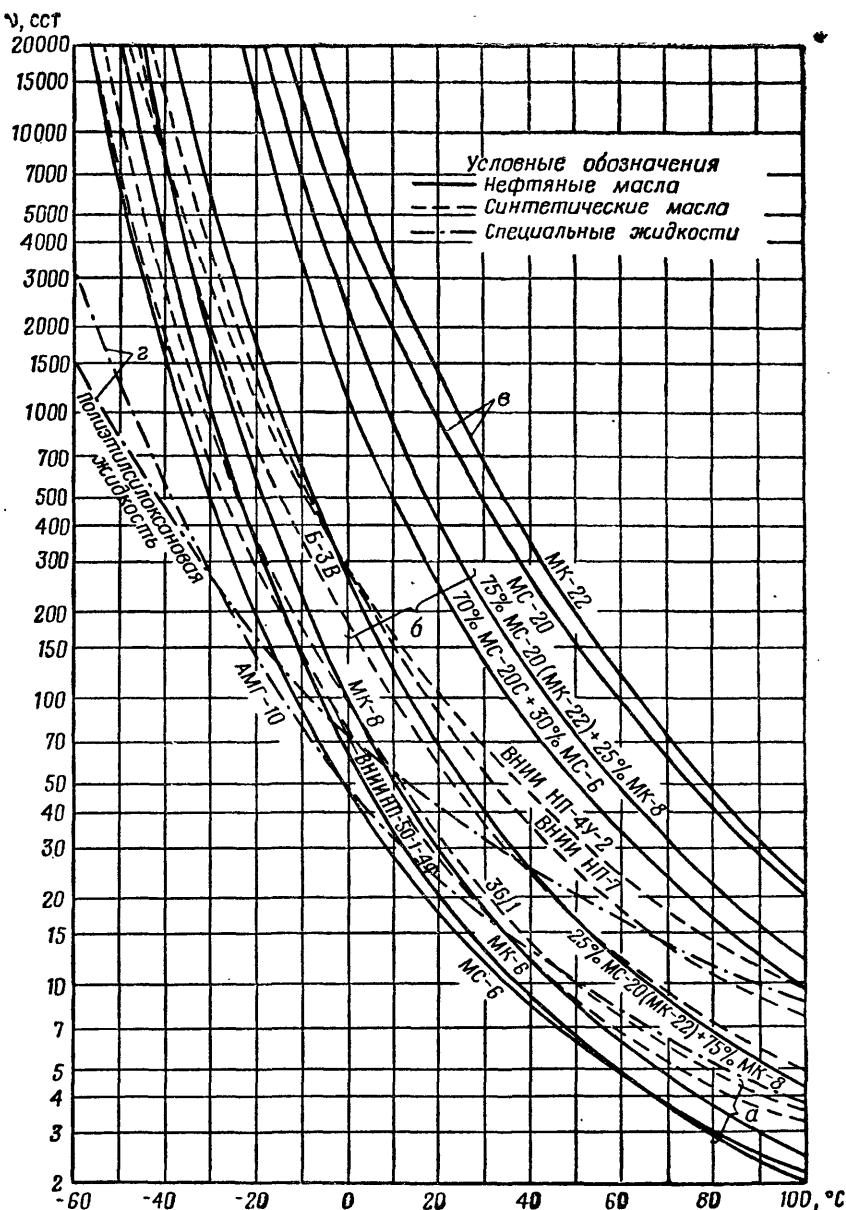


Рис. 47. Вязкостно-температурные характеристики авиационных масел:
а — для ТРД; б — для ТВД; в — для поршневых двигателей; г — для гидроустройств

малого режима или неисправностях, приводящих к опасно высоким нагрузкам или масляному голоданию, предотвращает за-

дир. *Антиокислительная* присадка (десятие доли процента) способствует удлинению срока службы синтетических масел до полного ресурса двигателя, что весьма существенно ввиду их дорогоизны и дефицитности. Вследствие ядовитости присадок при работе с синтетическими маслами должны соблюдаться меры предосторожности. Работать нужно только в спецодежде (комбинезоне, халате, фартуке). Нельзя допускать попадания масла в глаза и на кожный покров, руки следует покрывать специальной пленкой образующей пастой. Вблизи рабочего места нельзя есть, пить и курить; перед едой спецодежда должна быть снята и руки тщательно отмыты горячей водой с мылом. В случае попадания масла на кожу, одежду, инструмент, а также на наружные поверхности двигателя его нужно удалить ветошью, смоченной керосином, а затем промыть кожу и одежду водой с мылом [37, 59, 71, 96].

Зарубежные сорта

За рубежом главным производителем авиационных масел является фирма Shall. Она поставляет масла авиации США, Англии и большинства западноевропейских стран. Выпускаемое этой фирмой *диэфирное* синтетическое масло Turbooil-300 (ранее именовавшееся Turbooil-15) или Aeroshall-300 с вязкостью около 3,0—3,5 сст при 100°С применяется на многих типах ТРД сверхзвуковых самолетов (цифровое обозначение для синтетических масел этой фирмы соответствует умноженной на 100 вязкости в сст при температуре 210°F, т. е. 98,9° С). Основой масла обычно служит дизооктилсебацинат. Масло содержит более 5% присадок — антиизносную, антиокислительную, антипенную. Его температура застывания не выше —59° С, вязкость при —54° С не более 13 000 сст. Близкими к нему по составу и свойствам являются масла Castrol-3С (производства англо-американской фирмы Castrol Ltd) и Air-3513 (французского производства). Температурный предел применения всех этих масел 175—180° С, кратковременно до 240° С. На некоторых ТРД (в частности, английских) применяется более вязкое диэфирное масло Turbooil-750, единое для ТРД и ТВД.

Вырабатываются также более термостойкие масла для ТРД — *полиэфирные* различного состава и *смешанные* (ди- и полиэфиры), работоспособные до 200—210° С и кратковременно выдерживающие нагрев до 260° С. К их числу относится, например, масло Castrol-205 [37, 59].

НЕФТИНЫЕ МАСЛА ДЛЯ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Сорта

Для смазки ТРД дозвуковых и околозвуковых самолетов, а также некоторых типов сверхзвуковых самолетов с числом *M* не более 1,5—2 применяются нефтяные маловязкие масла селективной очистки МС-6 и кислотно-контактной очистки МК-6

и МК-8 (последнее было ряд лет основным сортом, а в настоящее время применительно к большинству типов двигателей рассматривается как заменитель). Кроме того, в качестве заменителя на некоторых двигателях допускается трансформаторное масло. На ТРД самолетов с числом $M \approx 2$, в частности на тех, где в качестве основных сортов предусмотрены синтетические масла, может применяться масло МК-8П (с антиокислительной присадкой); срок службы его ограничивается в зависимости от термонапряженности двигателя [1, 37, 59, 71].

Вязкость и пусковые свойства

Цифрой в марке перечисленных сортов нефтяных масел обозначается вязкость при температуре 50° С. Вязкость масел МК-6 и МС-6 при этой температуре должна быть в пределах 6,0—6,3 сст,

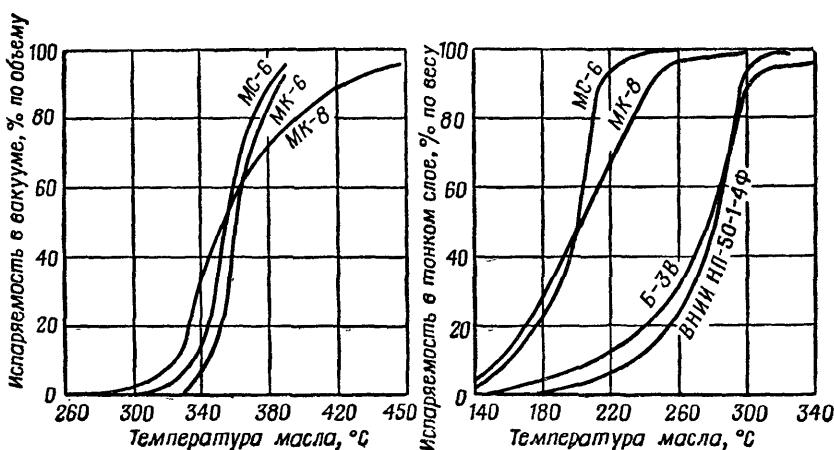


Рис. 48. Испаряемость (фракционный состав) некоторых нефтяных и синтетических масел

а масла МК-8 — не ниже 8,3 сст; в широком диапазоне температуры она показана на рис. 47. Для выработки этих масел используются малопарафинистые нефти или производится глубокая депарафинизация; таким путем достигается низкая температура застыивания масел — не выше —60° С для МК-6 и не выше —55° С для МК-8 и МС-6. Масла МС-6 и МК-6 имеют лучшие, чем МК-8, пусковые свойства, близкие к пусковым свойствам синтетических масел. Их преимущества еще больше после длительной работы в ТРД. Эти масла имеют более узкий фракционный состав по сравнению с маслом типа МК-8 (рис. 48). Обычный интервал их выкипания около 60° С (от 320 до 380° С в вакууме), тогда как для МК-8 он составляет примерно 180° С (от 260 до 440° С). Они содержат меньше как легкоиспаряющихся фракций (о чем свидетельствует, в частности, более

высокая температура вспышки — не ниже 140° С против 135° С для масла МК-8), так и тяжелых вязких фракций, которые могли бы ухудшить пусковые свойства масла по мере потери легких фракций. Это обеспечивает возможность запуска двигателя без предварительного подогрева примерно до —40° С в течение всего установленного срока службы. Свежее масло МК-8 обеспечивает холодный запуск ТРД примерно до —35° С, а после 100-часовой работы ТРД его вязкость при —40° С возрастает в 4—5 раз из-за испарения легких фракций (рис. 49), что вызывает затруднение запуска холодного двигателя уже при температуре ниже минус 25—30° С [1, 2, 37, 59].

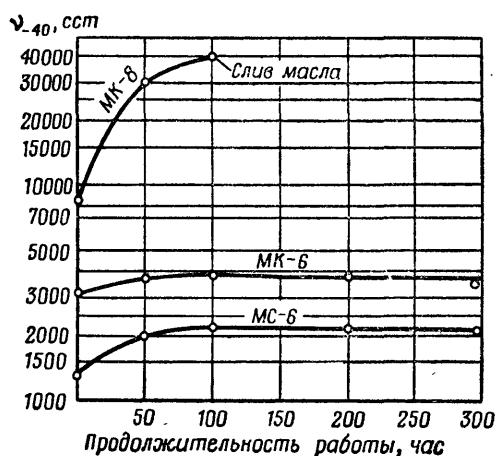


Рис. 49. Изменение вязкости при —40° С в процессе длительной работы масел в ТРД

достаточно. В условиях более высоких для подшипников сверхзвуковых ТРД, адсорбционная связь гравитационной пленки с металлом ослабевает, смаZOчная пленка при работе подшипников разрушается, усиливается их износ. В нефтяных маслах ТРД недопустимо значительное содержание естественных носителей смазывающей способности (кислород- и серасодержащих соединений, смолистых веществ и т. д.), так как в условиях высокой температуры они являются главными источниками отложений и коррозии.

Стабильность нефтяных масел в ТРД зависит от условий их применения. Окисление и загрязнение нефтяного масла в дозвуковых и околозвуковых ТРД обычно идет настолько медленно, что практически не лимитирует его срок службы в двигателе. В большинстве типов таких ТРД замена масла производится через 100—200 час и более. Однако на сверхзвуковых ТРД при температуре масла в зоне подшипников до 150—200° С и выше термоокислительная стабильность нефтяных масел оказывается недостаточной: на поверхностях подшипников образуются

Влияние на двигатель

По смазывающей способности все три сорта нефтяных масел для ТРД примерно равнозначны. Критическая нагрузка разрушения образуемой ими смазочной пленки по испытанию на четырехшариковой машине невелика — 28—30 кг (см. рис. 40). При температурном режиме подшипников, обычном для дозвуковых ТРД, этого

температуру, характерных

для ТРД, это

же температура, характерная

для ТРД, это

плотные лаковые отложения, а маслопроводы и форсунки засоряются углеродистыми осадками.

Масла МК-6 и МС-6 по стабильности несколько лучше, чем МК-8, так как они содержат меньше высококипящих малоустойчивых углеводородов. При этом масло МС-6 уступает маслу МК-6, потому что почти не содержит малоразветвленных полициклических углеводородов, которые при окислении образуют фенольные соединения — естественные антиокислители. Для обеспечения термоокислительной стабильности масла МС-6 в него добавляется антиокислительная присадка — дибутилкрезол (ионол) в количестве 0,2% [37, 71].

Улучшенные масла

Масло на основе МК-8, предназначенное для теплонапряженных двигателей, идет под маркой МК-8П. В нем содержится 0,6% дибутилкрезола (ионола). Расход присадки в процессе работы масла в двигателе зависит от температурного режима и других факторов, инициирующих окислительные реакции в масле; в одних теплонапряженных двигателях оно может работать не более 25 час, в других — до 50 час.

Ввиду дефицитности синтетических масел и недостаточно удовлетворительных эксплуатационных качеств чисто нефтяных масел разработаны своего рода «промежуточные» масла, которые имеют маловязкую нефтяную основу, например МС-6, но содержат 10—12% присадок (полимеры, фенолы, соединения серы, фосфора, хлора, азота), которые повышают вязкость, смазывающую способность, термостабильность [37, 59].

Трансформаторное масло

При температуре воздуха у земли не ниже -30°C на некоторых типах двигателей разрешается применять также трансформаторное масло. Его использование для смазки ТРД восходит к начальному периоду внедрения реактивной техники в авиацию, когда еще не было создано масел, специально предназначенных для ТРД. По большинству свойств оно близко к сорту МК-8, но уступает ему по пусковым свойствам и стабильности [65].

Зарубежные сорта

В США, Англии и ряде западноевропейских стран применяются масло 1010 (или Turbooil-2) с вязкостью не ниже 2,5 сст при 99°C и масло 1005 (или Turbooil-1) меньшей вязкости, специально предназначенное для арктических условий. Маркировка их произведена по вязкости в сст при 100°F (38°C) с прибавлением числа 1000 [37, 70].

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТРД С ОСОБО ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Углеводородные масла

Температура узлов трения ТРД самолетов недалекого будущего с числом $M=3$ предполагается порядка $300-400^\circ\text{C}$, а при $M=3,5 \div 4$, по-видимому, достигнет $450-600^\circ\text{C}$, что потребует существенного повышения термостойкости масел.

Исследования, проведенные за рубежом, показывают на возможность получения из недефицитного и дешевого нефтяного сырья масел для узлов трения с температурой $300-350^\circ\text{C}$, которые превосходят по термоокислительной и термической стабильности синтетические масла типа сложных эфиров. Способы их получения — глубокая очистка и гидрогенизация узких нефтяных фракций, а также химическая переработка непредельных и ароматических углеводородов, получаемых из нефтяного сырья в процессе производства топлив, и обязательное введение комплекса присадок. Потеря носителей смазывающей способности в результате глубокой очистки не играет роли при введении в масло эффективных противоизносных присадок. Состав масла должен быть подобран так, чтобы оно обладало высокой «приемистостью» к антиокислительным присадкам [37, 70].

Фтор- и хлорфторсодержащие масла

Из синтетических масел наиболее стойки в условиях высокой температуры считаются *фторуглеродные масла*. Они принципиально не способны окисляться, потому что фтор, будучи сильнейшим окислителем, образует более прочную связь с углеродом молекул, чем кислород. Они не горючи и химически неактивны — не вызывают коррозии, не боятся воздействия агрессивных компонентов, неядовиты. Фторуглеродные масла исключительно термостойки, они не образуют осадков до $450-500^\circ\text{C}$. Смазывающая способность их хорошая. Существенным недостатком этих масел является очень кратая вязкостно-температурная характеристика. Из-за этого фторуглеродное масло, подобранные для работы при высокой температуре, может оказаться непригодным не только при низкой, но и при умеренной температуре.

Несколько лучшую вязкостно-температурную характеристику, но меньшую термостойкость имеют *хлорфторуглеродные масла*. Они стабильны только до $300-360^\circ\text{C}$, но при разложении в условиях более высокой температуры не дают углеродистого осадка. Смазывающая способность их очень хорошая, коррозионная активность по отношению к большинству металлов (кроме меди) ничтожная. Важным качеством этих масел является стойкость по отношению к высокоагрессивным компонентам ракетного топлива и к жидкому кислороду, невоспламеняемость, что позволяет их применять для смазки турбонасосных агрегатов ЖРД. При попадании на кожу эти масла оказывают раздражающее воздействие.

Очень хорошую вязкостно-температурную характеристику в сочетании с термостабильностью имеют кремнийорганические масла, но они обладают плохой смазывающей способностью. В качестве высокотемпературных масел предполагается возможным использование приготовленных на их основе гибридных соединений — кремнийорганических фторэфиров, сочетающих главное достоинство кремнийорганических жидкостей (пологую вязкостно-температурную характеристику) и фторуглеродных соединений [37, 59, 70].

Расплавы металлов и стекла

Рост рабочих температур узлов трения ТРД в дальнейшем, вероятно, будет продолжаться, в результате чего окажутся непригодными даже самые термостойкие органические и элементоорганические жидкости. Принципиально возможные типы смазки в этих условиях — это расплавы металлов и стекла, твердые (сухие) смазочные материалы и газы.

Жидкие металлы обладают важными для смазочных материалов качествами — очень высокой теплопроводностью, облегчающей отвод тепла от трущихся поверхностей, весьма пологой вязкостно-температурной характеристикой, широким температурным диапазоном жидкого состояния. Главные трудности, мешающие их применению,— окисление воздухом с образованием твердых окислов (порошков, пленок) и высокая температура кристаллизации. Жидкая при обычной температуре ртуть непригодна, потому что она кипит при слишком низкой температуре (367°C при атмосферном давлении). При условии предварительного подогрева могут быть использованы низкоплавкие, стойкие к окислению галлий, индий и их сплавы. Температура плавления галлия 30°C , причем он склонен к переохлаждению. Индий плавится при 155°C ; при обычной температуре это мягкий металл (несмотря на высокую его плотность — 7,3). Его давно применяют в качестве антифрикционного покрытия в авиационных подшипниках. И галлий и индий не испаряются до очень высоких температур (температура кипения индия 1450°C , галлия 2070°C).

Может представить интерес попутное использование низкоплавких щелочных металлов как смазочного материала в тех ядерных силовых установках летательных аппаратов, где они служат теплоносителем или источником рабочего тела. Температура плавления цезия $28,5^{\circ}\text{C}$, калия 62°C , натрия $97,5^{\circ}\text{C}$, а их эвтектических сплавов еще ниже — сплава 76% калия и 24% цезия -48°C , сплава 77% калия и 23% натрия -12°C . Температура их кипения высокая (цезия 670°C , калия 760°C , натрия 883°C). Обращение с ними достаточно сложного: они бурно реагируют с кислородом (цезий самовоспламеняется на воздухе) и разлагают воду с выделением водорода, который при контакте воды с цезием и калием тут же загорается.

Идеально стойким к окислению жидким смазочным материалом может быть расплавленное стекло, так как оно является смесью окислов кремния SiO_2 , бора B_2O_3 и металлов. Изыскиваются относительно низкоплавкие композиции, обладающие в жидком виде необходимой смазывающей способностью [37].

Твердые (сухие) смазки

Твердое вещество может выполнять функции смазочного материала, если оно имеет слоистую микроструктуру со слабой межплоскостной связью, и способно адсорбироваться на трущихся поверхностях.

Как твердый смазочный материал давно известен *графит*. Расстояние между плоскими слоями его кристаллов почти в три раза больше, чем между атомами внутри слоев, а связь между слоями легко осуществляется подвижными электронами; он хорошо расщепляется по слоям. Плоские чешуйки графита прочно прилипают (притягиваются электростатическими силами) к стали,

чугуну, хрому, хуже — к меди, алюминию (это зависит в основном от характера окисных пленок на поверхности металла). Твердая графитная смазка при контакте с неосушенным воздухом обеспечивает коэффициент трения скольжения 0,04—0,08. Он резко растет с понижением давления воздуха и уменьшением влажности, в том числе в высотных условиях и вакууме (молекулы кислорода и воды, по-видимому, ослабляют межплоскостные связи графита). Коэффициент трения растет также с увеличением нагрузки и с повышением температуры, особенно выше 600° С; эта температура обычно считается пределом работоспособности твердой графитной смазки. Высокая теплопроводность графита, обусловленная свободными «металлическими» электронами, способствует отводу тепла от плоскостей сдвига и сохранению прочности смазочного слоя.

В последние годы за рубежом все шире применяется в качестве твердого смазывающего материала *дисульфид молибдена* MoS_2 — синевато-серый порошок с металлическим блеском. Он обладает слоистым строением кристаллов: расстояние между атомами серы, находящимися в различных слоях кристалла, почти в четыре раза больше по сравнению с расстоянием внутри слоев. Коэффициент трения при смазке дисульфидом молибдена в обычных атмосферных условиях примерно такой же, как у графита (0,05—0,095). Но при росте нагрузки и температуры, уменьшении влажности, снижении давления воздуха вплоть до вакуума он не растет, как у графита, а в два-три раза снижается. Это весьма ценно для высоконагруженных узлов трения и высотных условий. Влияние воздуха и влаги связано с относительно высокой химической активностью дисульфида молибдена: продукты реакции его с водой и кислородом имеют более высокий коэффициент трения. Несущая способность граничной смазочной пленки дисульфида молибдена выше, чем у любых смазочных масел. В контакте с воздухом дисульфид молибдена может применяться примерно до 450° С (при более высокой температуре он интенсивно окисляется), а в вакууме примерно до 1100° С; его температура плавления 1185° С. Он не разрушается при интенсивном радиационном воздействии.

Как считают иностранные специалисты, представляют интерес в качестве сухой смазки *фталоцианины меди* $\text{C}_{32}\text{H}_{16}\text{N}_6\text{Cu}$, *железа* $\text{C}_{32}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Fe}$ и другие — ярко-голубой или синий порошок, используемый для приготовления текстильных красителей. Это металлы, содержащие полициклические органические соединения с большими плоскими молекулами. Обладая слабыми межмолекулярными связями (что обеспечивает малое сопротивление сдвигу), они образуют химические связи с поверхностью металла.

На контактных поверхностях подшипников качения пленка фталоцианина удерживается до температуры 650° С. Коэффициент трения скольжения фталоцианинов при температуре до 300—400° С выше, чем у графита и дисульфида молибдена, но с повышением температуры до 500° С он уменьшается в несколько раз, примерно

до 0,03—0,05 (при контакте с воздухом). Фталоцианины отличаются необычной для органических соединений термостойкостью до температуры примерно 700° С, радиационной стойкостью к нейтронному и γ -излучению [12, 70].

Газовая смазка

Использование воздуха и других газов для смазки узлов трения весьма заманчиво в связи с их малой динамической вязкостью, примерно в 1000 раз меньшей, чем вязкость масел при высоких рабочих температурах узлов трения ТРД. Соответственно меньшее трение при условии полного разделения поверхностей слоем газа. С повышением температуры вязкость газов в противоположность вязкости жидкостей возрастает из-за усиления обмена молекулами между соседними слоями (при этом усиливается тормозящее или ускоряющее воздействие одного слоя на другой). Чем выше температура, тем смазочный слой жидкости хуже, а газа — лучше, надежней.

Принцип действия подшипников скольжения на газовой смазке может быть аэростатическим — создается газовая «подушка», поддерживающая вал даже тогда, когда он не вращается, и аэродинамическим — газ затягивается вращающимся валом в клиновидный зазор и отсасывает вал от поверхности подшипника. При высоких температурах воздух и некоторые другие газы могут вызывать коррозию поверхности. В газостатическом подшипнике коррозия не отражается на его работе. В газодинамическом подшипнике пленка продуктов реакции газовой смазки с металлом может привести к разрушению узла трения, если она хрупкая и твердая. Если же она мягче основного материала и мгновенно восстанавливается при механическом разрушении, то она ослабляет трение и уменьшает износ при касании вала с подшипником на переменных режимах (разгон при запуске, торможение перед остановкой, инерционные нагрузки, тряска). По существу газ в этом случае выступает в роли активного поставщика твердой смазки. Эффективными газовыми смазками такого рода считаются хлор, сероводород.

Наибольший антиизносный эффект дает такой газ, который не действует на материалы узла трения при обычной рабочей температуре, но хорошо адсорбируется поверхностью и при фрикционном разогреве в момент касания разлагается, вступает в реакцию с поверхностью контакта и моментально восстанавливает срабатываемую пленку. Подобное действие оказывают, в частности, галогенопроизводные углеводородов CF_2Br_2 , CF_3Br , CF_2Cl_2 и гексафторид серы SF_6 . Для обеспечения граничной смазочной пленки к газу может подмешиваться распыленное масло, но термостойкость смазки в этом случае ограничивается свойствами масла. Охлаждение узлов трения с особо высоким температурным режимом может быть обеспечено наилучшим образом при водородной смазке, поскольку водород обладает очень высокой теплоемкостью и теплопроводностью [37, 59, 70].

ОСОБЕННОСТИ СМАЗКИ ТУРБОВИНТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ НА НИХ МАСЛА

Влияние редуктора

Турбовинтовые двигатели самолетов имеют редуктор, понижающий число оборотов при передаче мощности от вала турбины на воздушный винт в 10—15 раз, а двигатели вертолетов — в несколько десятков раз. Соответственно возрастает крутящий момент и нагрузки в зацеплении шестерен редуктора. Кроме того, они работают со значительно большей продолжительностью контакта, чем в подшипниках качения. Редуктору ТВД нужно более вязкое масло, чем для смазки подшипников, с более высокой смазывающей способностью и луч-

шими противозадирными свойствами. Для ТВД характерна высокая теплоотдача в масло из-за превращения в теплоту мощности трения в редукторе, соответствующей нескольким десяткам лошадиных сил. В связи с необходимостью отвода этого тепла количество и прокачка масла в ТВД в несколько раз больше, чем в ТРД.

Достаточно высокий температурный режим подшипников, в особенности турбины, и нагрев масла в редукторе заставляют применять в ТВД масло с высокой термоокислительной стабильностью. Ее трудно сочетать с хорошими смазывающими и противозадирными свойствами нефтяных масел. Поэтому разработка и внедрение синтетических масел для ТВД начались раньше, чем для ТРД. Свойства масла, существенные для работы редуктора ТВД, и возможные последствия неудовлетворительного качества масла приведены на рис. 45 справа [37, 59, 92, 112].

Синтетические масла для ТВД

На самолетных ТВД применяется синтетическое масло ВНИИ НП-7 (вязкость 7,5—8,0 сст при 100° С). Оно состоит из той же диэфирной основы, которая используется при выработке синтетических масел для ТРД, и загустителя — полимера, растворенного в основе. Обладая достаточно высокой вязкостью, необходимой для смазки высоконагруженного редуктора ТВД, загущенное масло ВНИИ НП-7 имеет пологую вязкостно-температурную характеристику, свойственную его маловязкой основе (рис. 47). Таким образом, устраняется главный недостаток вязких масел — резкое повышение вязкости при понижении температуры. Это масло обеспечивает запуск двигателя без подогрева примерно до —30° С. «Размол» вязкостной присадки при длительной работе масел приводит к некоторому снижению вязкости масла.

Для вертолетных газотурбинных силовых установок предназначено единое синтетическое полиэфирное масло Б-3В (вязкость не менее 5,0 сст при 100° С), обеспечивающее смазку двигателя и главного редуктора. По вязкостным свойствам оно является промежуточным между синтетическим маслом, применяемым на самолетных ТВД, и маслами для ТРД (рис. 47). Меньшая вязкость этого масла в основном рабочем диапазоне температуры способствует лучшей циркуляции его в зоне смазываемых узлов трения и эффективному их охлаждению.

Оба сорта синтетических масел ТВД застывают ниже —60° С. Противоизносные и противозадирные свойства их обеспечиваются как поверхностью активной основой, так и эффективной присадкой — трикрезилфосфатом или меркаптобензоизолом, добавляемым в большем количестве, чем в масла для ТРД. Обычные требования к противоизносным свойствам масел для ТВД — критическая нагрузка на четырехшариковой машине не менее 90 кг или вдвое большая, чем для нефтяного остаточного масла МС-20 (рис. 40).

Масла рассчитаны на работу без замены в течение полного ресурса ТВД, достигающего нескольких тысяч часов. В целях обеспечения стабильности масел и уменьшения воздействия их на детали двигателя при столь длительной работе в составе синтетических масел для ТВД имеются антиокислительная и антикоррозионная присадка. В связи с ядовитостью присадок требуется соблюдение тех же мер предосторожности, которые предусмотрены при работе с синтетическими маслами для ТРД [1, 37, 59, 65, 71, 96].

Смеси нефтяных масел

Наряду с синтетическими маслами на большинстве ТВД разрешается применять с ограничениями по сроку замены нефтяные маслосмеси трех типов: с вязкостью при 100° С в пределах 4,5—6,0 сст, 6—7 сст и 9—13 сст. Ранее они были основным смазочным материалом для ТВД. В этих маслосмесях носителем качеств, необходимых для смазки подшипников роторов ТВД, предполагается маловязкое масло (МК-8, МК-6, МС-6 или трансформаторное), а носителем противоизносных свойств, обеспечивающих нормальную работу редукторов,— высоковязкое масло, получаемое из остаточной фракции мазута, богатой поверхностноактивными веществами (сорта МК-22, МС-20 или МС-20С, предназначенные для авиационных поршневых двигателей).

Компромиссный характер смеси двух разнородных масел вызывает определенные неприятности. После испарения легких фракций усиливается лакообразование на горячих подшипниках турбины и ухудшаются пусковые свойства. Вязкостно-температурные характеристики смеси с вязкостью 9—13 сст при 100° С (см. рис. 47) вообще неудовлетворительные. Вследствие этого при внешней температуре ниже 0—5° С горячее масло на некоторых типах самолетов после полетов приходится сливать, а перед запуском двигателя разогревать и заправлять вновь.

Достаточно вязкое масло, удовлетворительно работающее в ТВД при низких температурах, может быть получено в результате загущения маловязкого нефтяного масла высокомолекулярным полимером (например, полиметакрилатом, полизобутиленом). Необходимые противоизносные и другие качества придаются ему комплексом присадок. Ввиду дефицитности синтетических масел для ТВД самолетов может применяться такого рода загущенное нефтяное масло с присадками, имеющее вязкость не менее 7,5 сст при 100° С — МН-7,5 [1, 37, 59].

Зарубежные сорта

За рубежом для смазки ТВД применяется главным образом английское синтетическое полиэфирное масло Turbooil-750 (прежняя его марка Turbooil-35, иногда его обозначают 35Н), содержащее

загуститель типа полиметакрилата. Его вязкость не ниже 7,5 сст при 99° С. Оно имеет отличные противоизносные характеристики, но недостаточно удовлетворительные пусковые свойства. Аналогичное по вязкостным характеристикам синтетическое масло, состоящее из 66% диоктилсебацината, 28% полигликолевого эфира и 6% различных присадок выпускается фирмой Castrol Ltd марки Castrol-98 или OX-38. Эти масла используются не только на ТВД, их применяют и на некоторых типах ТРД. Выпущено также новое синтетическое масло Extra Turbooil-724 фирмы Esso, отличающееся высокой термоокислительной стабильностью.

Наряду с синтетическими применяются нефтяные масла различной вязкости: английские и американские сорта 1010 или Turbooil-2 (вязкость при 99° С не менее 2,5 сст), Turbooil-3 (не менее 3,5 сст), Turbooil-9 (в пределах 8,7—9,3 сст), сортов 1080 и 1100 (в пределах 19—21 сст), а также французское масло Air-3512.

Как зарубежный, так и отечественный опыт и соответствующие расчеты показывают, что синтетические масла для ТВД по сравнению с нефтяными обеспечивают не только эксплуатационные преимущества и надежность, но и выгодны в коммерческом отношении, несмотря на их значительно большую стоимость. Экономия при использовании синтетических масел достигается вследствие увеличения срока службы масла и снижения затрат времени и топлива на подогрев двигателей перед запуском. Кроме того, отработавшие синтетические масла легко регенерировать [37, 59].

МАСЛА ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Система смазки

Авиационные поршневые двигатели имеют сложную систему смазки, условия работы масла в них тяжелые. Масло в двигателе циркулирует под давлением от 4 до 10 атмосфер, основная часть его идет на смазку большой площади высоконагруженных узлов трения скольжения, достигающей 1 м². Смазка цилиндро-поршневой группы производится путем подвода масла к верхним головкам шатунов, а также разбрзгивания его; некоторое количество масла неизбежно проникает в камеру сгорания и выгорает. Чтобы обеспечить жидкостное трение (образование масляного клина) и уплотнение зазора между поршнями и цилиндрами, препятствующее протеканию продуктов сгорания в картер, масло должно иметь высокую вязкость в условиях высокой рабочей температуры — не ниже 20—22 сст при 100° С [11, 59].

Значение вязкости

При недостаточной вязкости жидкий слой масла не может удержаться в зазорах и в результате усиливается износ деталей, ухудшается уплотнение поршневых колец, падают компрессия и

мощность двигателя, происходят прорыв газов в картер двигателя и загрязнение масла, следствием чего являются усиленная коррозия подшипников и интенсивное осадкообразование. Чрезмерно жидкое масло забрасывается при движении поршней в цилиндры, в результате чего повышается расход масла, увеличивается нагрообразование, замасливается свечи и происходят перебои в зажигании, возникает детонация и разрушается поверхность поршня и других деталей камеры сгорания.

Однако чрезмерно высокая вязкость масла также нежелательна, так как она приводит к увеличению сил трения, особенно при низких температурах, в результате чего возрастают потери мощности на прокачку масла и на трение при режимной работе. Затрудняется запуск двигателя, уменьшается прокачка масла через сеть каналов маслосистемы, ухудшается разбрзгивание масла, возникает масляное голодание: свежее масло к узлам трения не поступает, а находящееся в них масло разогревается от трения и вытекает. Результатом, как и при слишком низкой вязкости, является повышенный износ или даже заедание и задир трущихся деталей.

Масло для поршневых двигателей должно иметь высокую смазывающую способность, граничная пленка масла должна защищать узлы двигателя от сухого трения при запуске и останове и, кроме того, обеспечивать надежную работу шестерен редуктора и других силовых передач, где нет условий для образования жидкостного масляного клина. Частично это обеспечивается высокой вязкостью, которая способствует образованию толстого поверхностного слоя масла, однако в составе масла должны быть поверхностноактивные соединения — носители смазывающей способности [1, 59, 72].

Требования к стабильности

В связи с высоким температурным режимом в зоне поршневой группы ($200-300^{\circ}\text{C}$), контактом с горячим газом и воздухом при работе двигателя создаются условия для интенсивного лакообразования. Лак, собирающийся в канавках поршней, может прихватить поршневые кольца и даже заклинить их, в результате чего могут произойти поломка колец, задир зеркала цилиндра и выход двигателя из строя. В связи с этим необходима достаточно глубокая очистка масла от склонных к лакообразованию нестабильных органических соединений, что ухудшает смазывающую способность масла. Необходимость глубокой очистки связана также с тем, что материал подшипников поршневых двигателей — свинцовистая бронза — отличается значительным катализитическим действием, усиливающим процесс окисления в масле, в том числе образования коррозионноактивных веществ. В то же время свинцовистая бронза нестойка против коррозии и чрезвычайно чувствительна к загрязнению масла [59, 72].

Сорта масел

На всех авиационных поршневых двигателях применяются масла МК-22, МС-20 и незначительно отличающееся от него масло из сернистых нефтей МС-20С (в марках этих масел цифра обозначает нижний предел вязкости при 100° С). Это сравнительно дорогие и дефицитные остаточные масла высокой степени очистки из отборных масляных нефтей. В остаточных продуктах вакуумной перегонки мазута гораздо больше полярных веществ — носителей смазывающей способности, чем в дистиллятных. Наименее устойчивые из них удаляют при очистке масла. Таким образом, в какой-то мере разрешается противоречие между трудно совместимыми требованиями хорошей смазывающей способности и термической стабильности.

При работе в двигателях все три сорта масла, как показал опыт, практически равнозначны. Ввиду этого при дозировках самолетов их можно смешивать в любых соотношениях. Те отличия в физико-химических свойствах, которые имеются между этими маслами (по температуре застывания, кислотному числу, коксемости и т. д.), важны только с точки зрения контроля кондиционности свежего масла каждой марки. В процессе работы в двигателе они практически выравниваются. Сера, содержащаяся в масле МС-20С в количестве до 1%, входит в состав неактивных соединений и не оказывает вредного влияния на двигатели [1, 65].

Пусковые свойства

Все три сорта масел имеют неудовлетворительные низкотемпературные свойства: масла МС-20 и МС-20С застывают при —18° С, а МК-22 при —14° С. Заставление происходит из-за резкого повышения вязкости с понижением температуры (см. рис. 47), поэтому присадки-депрессаторы не могут снизить температуру застывания.

В зимнее время для облегчения последующего запуска авиационного поршневого двигателя масло перед его остановкой разжижают бензином (в количестве 10% емкости маслосистемы). В результате разжижения температура застывания масла понижается примерно на 10° С, запуск двигателя оказывается возможным до температуры минус 25—30° С (с неразжиженным маслом — до минус 5—10°). Разжижение обеспечивает поступление жидкой подвижной смазки ко всем трущимся деталям и облегчает раскрутку вала двигателя стартером. После запуска двигателя бензин из разжиженного масла испаряется и высокая вязкость масла постепенно восстанавливается. В масле остается лишь 2—3% бензина; такое количество топлива в масле бывает и без искусственного разжижения в результате проникновения его из цилиндров двигателя.

При температуре ниже минус 25—30° С масло после полетов из маслосистемы сливают, а перед запуском нагревают до 90—100° С и заливают вновь. Перед заливкой горячего масла в маслосистему двигатель подогревают с помощью аэродромных средств [1, 65, 81].

Срок службы

Свойства свежего масла в первые часы работы его в двигателе резко изменяются. Из-за накопления продуктов окисления и разложения быстро возрастают кислотное число и коксуюмость. В масле появляются механические примеси — пыль, частицы износа. Вместе с окислами свинца, попадающими из топлива, они вызывают увеличение зольности. Изменяется также вязкость и другие показатели. В дальнейшем эти изменения происходят менее резко (см. рис. 44, а) за счет долива масла и за счет стабилизации масла, работающего в двигателе. Стабилизации способствует фильтрация масла, центрифугирование его внутри коленчатого вала двигателя, а также образование в процессе окисления масла фенольных соединений, которые тормозят дальнейшее окисление.

Масла с физико-химическими показателями, получающимися после их стабилизации через несколько десятков часов работы масла в двигателе (т. е. с возрастшей во много раз коксуюмостью, зольностью и т. д.), вполне обеспечивают его нормальную работу. Поэтому нет необходимости в частой замене масла. В большинстве авиационных поршневых двигателей масло заменяют через каждые 100 час наработки [1, 59, 72, 81].

Зарубежные сорта

Многие зарубежные нефтяные масла для авиационных поршневых двигателей имеют сходные свойства с отечественными маслами, в частности, американские масла сортов 1065, 1080 и 1100, соответствующее последней марке английское масло Oil-100 или B/O (международное обозначение ОМ-270). Кроме того, применяется более вязкое масло для тропических условий (вязкость при 99° С в пределах 25—28 сст) под маркой Oil-120 или сорт С (международное обозначение ОМ-370) [59, 72].

Глава 9

МАСЛА ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

ТРАНСМИССИОННЫЕ МАСЛА

Особенности работы

Особо высокими контактными нагрузками отличаются редукторы трансмиссии хвостового винта и шарниры автомата перекоса несущего винта вертолетов, а также червячные механизмы рулевого привода самолетов. Условия работы масла в этих механизмах иные, чем в двигателе. В каждый данный момент оно работает только на очень узком участке контакта в виде тонкой граничной пленки, адсорбированной поверхностью. Из-за очень большой нагрузки жидкий слой масла в зоне контакта силовой передачи исключен. Однако даже граничная пленка на наиболее нагруженных участках частично разрушается.

Чтобы трансмиссионное масло предохраняло шестерни, червячные пары и шарниры от износа, задира и сваривания (схватывания), оно должно, во-первых, иметь особо высокую смазывающую способность — лучше чем любые другие масла прилипать к поверхностям трения, во-вторых, обладать особо высокими противозадирными свойствами. Их сущность состоит в химическом воздействии масла на металл, в результате которого сам поверхностный слой деталей в зоне контакта превращается в твердую смазочную пленку (окисную, сульфидную, фосфидную, хлоридную и т. п.). Поскольку в процессе трения с высоким контактным давлением и эта твердая пленка разрушается, химическое воздействие масла на металл должно быть настолько интенсивным, чтобы обеспечить ее немедленное восстановление, не допускать оголения металла.

Температура масла вне зоны контакта обычно невысокая (порядка 50—60°С); площадь соприкосновения масла с кислородом воздуха невелика. Поэтому не возникает условий для сколько-нибудь интенсивных процессов окисления и разложения в объеме масла и коррозионного действия его на детали вне зоны контакта.

Следовательно, к трансмиссионным маслам незачем предъявлять требование стабильности при высоких температурах и отсутствия коррозионноактивных примесей [11, 59].

Состав масел

Носителями смазывающей способности нефтяного масла, как известно, являются содержащиеся в нем нестабильные при высоких температурах смолы, коррозионноактивные органические кислоты, сернистые и некоторые другие соединения. Из-за того, что эти вещества при высокой температуре опасны для двигателей, приходится масла от них в основном очищать. Но в условиях работы, характерных для трансмиссионных масел, они вполне допустимы. Поэтому для приготовления трансмиссионных масел используют неочищенные нефтяные масла и смолистый экстракт, извлекаемый из моторных масел при их селективной очистке (смолку). Другой путь обеспечения необходимой смазывающей способности — приготовление трансмиссионных масел на синтетической основе, которая обладает ею по своей природе.

Для обеспечения противозадирных свойств в дополнение к естественным химически активным веществам в состав трансмиссионных масел вводят присадки, содержащие хлор, фосфор, серу, которые образуют с поверхностным слоем металла легко разрушаемую коррозионную пленку, резко снижающую коэффициент трения. Лучше всего иметь их в составе таких соединений, которые при обычной температуре масла в объеме корпуса механизма (т. е. ниже 100° С) практически не действуют на металл, а в зоне контакта при повышении температуры в результате трения до 150—200° С и выше разлагаются и вступают с металлом в реакцию.

Температура плавления коррозионных пленок (в особенности фосфидных) ниже, чем металла. Расплавление тонкого слоя тяжело нагруженных трущихся поверхностей при нагреве, вызванном трением, способствует их взаимному выглаживанию и приработке. На гладкой поверхности в свою очередь лучше удерживается граничная пленка масла, защищающая металл от износа. Коррозионный поверхностный слой, расплавляясь, как известно, не вызывает схватывания металлов, предотвращая тем самым сваривание и поломку зубьев, шарниров и т. п. [41, 72].

Противоречивые требования к вязкости

В течение ряда лет для смазки трансмиссий применяли только высоковязкие масла. Они обладают безусловно лучшими противоизносными свойствами, чем подобные же мало- и средневязкие масла, не содержащие противоизносных присадок, так как граничная смазывающая пленка тем толще, чем выше вязкость. Однако противоизносные качества масла могут быть обеспечены

независимо от вязкости за счет присадок. В этом случае желательно, чтобы масло имело невысокую вязкость, которая не препятствовала бы началу движения трансмиссии при низких температурах. При режимной работе более подвижное маловязкое масло обеспечивает лучший отвод тепла от шестерен и других пар трения, что способствует улучшению их граничной смазки [40, 41, 72].

Сорта масел

В настоящее время для смазки промежуточного и хвостового редукторов вертолетов (а на Ми-1 и главного редуктора) применяют гипоидное масло — осерненную смесь смолки и маловязкого масляного дистиллята с добавкой депрессатора. Гипоидное масло содержит 1,5—3,5% серы, в том числе свободную серу. Оно надежно предотвращает задир и «схватывание» металла при высоких нагрузках, но износ при его применении значительный. Это объясняется его высокой вязкостью (20—30 сст при 100°C). Движение масла внутри корпуса редуктора недостаточно, шестерни плохо охлаждаются, и граничная смазывающая пленка оказывается не очень прочной. Кроме того, вязкое гипоидное масло имеет неудовлетворительные низкотемпературные свойства — температура застывания летнего масла около —5°C, зимнего —20°C. Зимой на вертолетах гипоидное масло разжижают маловязким низкозастывающим гидромаслом АМГ-10 в соотношении 2:1.

Смесь гипоидного масла с гидромаслом АМГ-10 применяется также на некоторых типах самолетов в червячных механизмах перестановки стабилизатора. Близкой по составу и свойствам к трансмиссионным маслам является жидккая консистентная смазка ЦИАТИМ-208, применяемая в механизмах гидропривода и уборки шасси тяжелых самолетов.

Шарниры автомата перекоса вертолетов смазываются при положительных температурах маслом МС-20, а при отрицательных температурах в районах с умеренными морозами — маслом МС-14, которое отличается от МС-20 меньшей вязкостью и более низкой температурой застывания (не выше —30°C). Возможность использования этих масел, получаемых из остаточной фракции мазута, в качестве трансмиссионных обусловлена значительным содержанием в них поверхностноактивных веществ. При низких температурах в холодных районах применяется специальное шарнирное масло ВНИИ НП-25, работоспособное в пределах температур от —50°C до +40°C. Оно представляет собой сравнительно маловязкую (для данного класса масел) смесь дизэфирного и нефтяного масел с противозадирными и антиокислительными присадками. Вязкость его при 100°C не менее 9,8 сст, при —40°C не более 55 000 сст, а температура застывания не выше —54°C. По противозадирным свойствам оно лучше, чем масло МС-20 [65, 96].

МАСЛА ДЛЯ УМЕРЕННО НАГРУЖЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ, АГРЕГАТОВ И УЗЛОВ

Нефтяные масла

На самолетах и вертолетах для смазки различных механизмов, агрегатов и узлов, работающих в условиях невысоких удельных давлений, применяют масла для двигателей и специальные сорта нефтяных и синтетических масел, а также растительные и животные жиры.

Веретенное масло АУ используется в подвижных сочленениях шасси и некоторых узлах вооружения. Это высокоочищенное нефтяное масло с низкой температурой застывания (не выше -45°C), несколько более вязкое, чем масла ТРД (его вязкость 12—14 *сст* при 50°C).

Масло МВС используется для смазки манжет поршней-штоков и уплотнений цилиндров в исполнительных механизмах воздушных систем. Это типичное загущенное масло, приготовленное аналогично гидромаслу АМГ-10. Его основой служит высококипящая низкоаэтизированная керосиновая фракция, а загустителем — винил-поли, добавляемый в большом количестве — до 25%. Этим обеспечивается сочетание высокой вязкости (70—90 *сст* при 50°C) и хороших низкотемпературных свойств (температура застывания не выше -60°C). Масло МВС делает манжеты эластичными, обеспечивает надежную и плавную работу устройств, управляемых сжатым воздухом. Стабильность масла МВС обеспечивается антиокислительной присадкой — α -нафтиламином (0,1%). Цвет масла МВС красный или розовый [65, 72, 96].

Кремнийорганическое масло

Для смазки резиновых деталей, трущихся о металл, в воздушных системах используется также *смазка № 6* — полисилоксановая жидкость высокой вязкости (200—275 *сст* при 20°C), бесцветная или слabo-желтая. Только кремнийорганическое масло может при такой вязкости иметь хорошие низкотемпературные свойства — смазка № 6 имеет температуру застывания ниже -70°C , а при температуре -60°C обладает значительно меньшей вязкостью, чем нефтяные и синтетические масла для двигателей (не более 15 000 *сст*). Она практически не испаряется при работе. Смачивая резину, смазка не оказывает на нее вредного воздействия. На стали она не образует граничной смазывающей пленки [72].

Природные жиры

На вертолетах резиновые кольца опор хвостового винта смазываются растительным *касторовым маслом*. Вязкость его около 130 *сст* при 50°C , температура застывания -16°C ; испаряемость масла незначительная. Оно отличается особо высокой липкостью. Кожаные замки лопастей несущего винта вертолетов

смазываются рыбьим жиром, экстрагируемым растворителями при переработке рыбы. Он представляет собой смесь различных триглицеридов непредельных органических кислот. Умягчая кожаные уплотнения, он обеспечивает их плотное прилегание [59].

ПРИБОРНЫЕ МАСЛА

Условия работы

Приборные масла служат для уменьшения трения и износа и одновременно для защиты от коррозии разнообразных узлов радиотехнического и прицельного оборудования, высокооборотных гироскопических приборов и тахометров, электрических машин, турбоходильников, фотооборудования, часовых механизмов, стрелочных приборов в кабинах и т. д. Они работают в широком диапазоне температуры — от -60°C до $+100^{\circ}\text{C}$ и выше. Значительных длительно действующих нагрузок трущиеся узлы приборов обычно не испытывают, но подвергаются вибрациям. Скорость движения деталей в некоторых приборах очень велика (например, число оборотов ротора гироскопа 15 000—30 000 в минуту). Перемещение деталей приборов (особенно — начало перемещения) ни в коем случае не должно тормозиться маслом, так как это может вызвать ошибки в показаниях и сигналах. В связи с этим приборные масла должны иметь невысокую вязкость (в том числе при низких температурах), обеспечивающую свободное перемещение трущихся деталей приборов, но достаточную для предотвращения утечки масла. При отсутствии масляных емкостей большое значение имеет высокое поверхностное натяжение масла, препятствующее его растеканию. Приборное масло должно обладать смазывающей способностью по отношению к тем своеобразным материалам, которые применяются в приборах, — редким и драгоценным металлам, твердым минералам, стеклу. Оно должно быть очень чистым и химически пассивным по отношению к материалам приборов. Многие приборы смазываются только при их изготовлении и при ремонте; смазывать их в эксплуатации запрещается, чтобы не разрегулировать прибор и не внести в него грязь. В связи с длительным сроком работы приборных масел необходимо, чтобы они при нормальной температуре были химически весьма стабильны и практически не испарялись [59, 81].

Кремнийорганические масла

Важнейшая группа приборных масел — масла ОКБ-122, главной составной частью которых является этилполисилоксановая жидкость. Она имеет рекордно пологую вязкостно-температурную характеристику, стабильна, нелетуча, но не обла-

дает достаточной смазывающей способностью. Для улучшения смазывающих свойств к ней добавлены нефтяные масла — веретенное АУ или МС-14 (от 15 до 40%). Температура застывания масел ОКБ-122 — 70°С. Они стойки против окисления. Температура вспышки этих масел (характеризующая их испаряемость) высокая — порядка 160—170°С. Наименьшую вязкость из этой группы масел имеют сорта ОКБ-122-3 и ОКБ-122-4 (от 11 до 14 сст при 50°С), более высокую — сорта ОКБ-122-5 и ОКБ-122-14 (порядка 20 сст при 50°С), наибольшую — сорт ОКБ-122-16 (около 25 сст при 50°С). Кремнийорганические масла могут взаимодействовать с медью и свинцом, поэтому они несовместимы с латунью и непригодны для некоторых устройств и приборов с ответственными деталями из латуни [59, 70, 71, 96].

Приборное масло МВП

Из натуральных нефтяных масляных дистиллятов с вязкостью при 50°С около 6 сст масло МВП отличается самой низкой температурой застывания (ниже —60°С). Для достижения такой температуры застывания это масло изготавливают из беспарафинистых нефтей. Несмотря на это, масло МВП при температуре примерно —40°С уже практически неработоспособно из-за возрастания вязкости. Масло МВП благодаря весьма глубокой очистке не вызывает коррозии металлов даже при длительной работе, но не отличается хорошей смазывающей способностью, так как при очистке из него удаляются вещества, являющиеся носителями этого свойства [59, 65].

Часовые масла

Часовые механизмы и некоторые узлы радиотехнического оборудования самолетов смазывают *костным маслом* (получаемым из копытного жира) и *часовым маслом МЦ-3*, представляющим смесь костного и маловязкого нефтяного масла с добавлением антиокислительной присадки. Для костного масла характерна способность удерживаться в миниатюрных узлах трения, не растекаясь и не испаряясь (температура вспышки выше 300°С). Оно имеет низкий коэффициент трения граничного слоя. Все это делает его незаменимым для часовых механизмов. Вязкость костного масла 80—95 сст при 20°С, температура застывания —18°С (это существенно только с точки зрения возможности его внесения в механизм). Вязкость и температура застывания масла МЦ-3 несколько ниже [81, 96].

Глава 10

КОНСИСТЕНТНЫЕ СМАЗКИ

СОСТАВ И СТРУКТУРА КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОК

Общая характеристика

Консистентные смазки — микронеоднородные смеси жидкых масел с твердыми загустителями, ограничивающими их текучесть. Большинство консистентных смазок пластичны (пластичностью называется способность твердых тел при воздействии внешних сил изменять свою форму, не разрушаясь при этом). Пластичные смазки занимают промежуточное положение между твердыми телами и жидкостями: они не растекаются под действием собственного веса и обычных инерционных сил, а при больших нагрузках текут подобно вязким жидкостям. Это придает им особенные эксплуатационные свойства и позволяет использовать их в таких узлах трения, где жидккая смазка не удерживается или куда ее трудно подвести. Их применяют также для герметизации резьбовых и других соединений в трубопроводах, клепанных швов и т. д., для защиты открытых поверхностей деталей от загрязнения и предохранения их от коррозии и, наконец, в технологических целях, в частности для притирки и облегчения приработки трущихся деталей. Помимо пластичных существуют жидкие и полужидкие (сметанообразные) консистентные смазки, которые текут под действием собственного веса. Они в ряде случаев удобнее пластичных — для смазки и чистки ствольного оружия, для внутренней консервации двигателей, в технологических процессах.

В соответствии с назначением консистентные смазки обычно делят на четыре группы: антифрикционные, уплотнительные, защитные (или консервационные) и технологические. Однако функции смазок часто переплетаются. Это особенно относится к антифрикционным смазкам. Они, как правило, одновременно играют роль защитных от коррозии, служат для герметизации узлов трения от попадания в них загрязнений, способствуют полезной модификации трущихся поверхностей (притирке) [17, 59, 64, 65].

Загустители

В качестве загустителей в составе смазок обычно применяются твердые, но достаточно пластичные вещества — главным образом

мыла (натриевые, литиевые, кальциевые и др.), а также твердые углеводороды (парафин, церезин). Некоторые смазки загущаются специально обработанным силикагелем, органическими и фторуглеродными полимерами, твердыми смазочными веществами — графитом, дисульфидом молибдена. Загуститель содержится в смазках в небольшом количестве (как правило, не более 10—20% от веса смазки).

В пластичных смазках сросшиеся кристаллики загустителя образуют непрерывный, но рыхлый *структурный каркас* смазки, в ячейках которого находится жидкое масло. Структура скелета

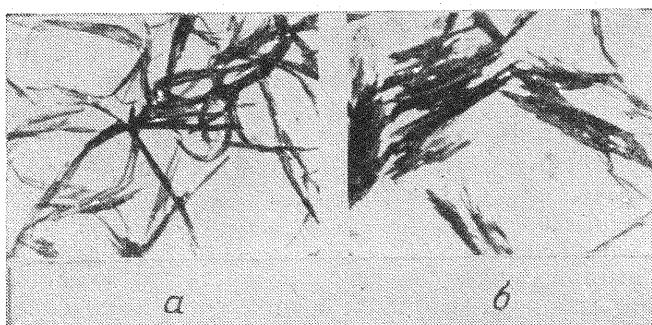


Рис. 50. Микроструктура смазки ЦИАТИМ-210 ($\times 10\ 000$); *а* — до механического воздействия; *б* — после интенсивного механического воздействия (2 часа по 400 ударов в минуту)

полужидких смазок также непрерывна, но связи между соседними кристалликами загустителя в них настолько слабы, что при действии даже малых сил (в том числе силы тяжести) приобретают эпизодический характер: они разрушаются, а затем восстанавливаются. В жидких смазках твердые частицы загустителязвешены в масле; они создают густую консистенцию, тормозя течение жидкой фазы.

Обычно кристаллы загустителя имеют *ните-* или *лентовидную* форму (рис. 50). Их значительная в масштабе микронеоднородных систем протяженность (от сотых до десятых долей миллиметра) обеспечивает микроволокнистую структуру образуемого ими пространственного каркаса смазки. Поперечные размеры кристаллов порядка десятой доли микрона, что обеспечивает свойственную коллоидным системам огромную величину поверхности контакта двух фаз, по которой действуют адсорбционные силы. Это придает двухфазной системе устойчивость, нераздельность, так называемую *коллоидную стабильность*.

Свойства пластичных смазок определяются главным образом загустителем и в меньшей мере — маслом. Так, *натриевое мыло* обеспечивает смазке прочность и тугоплавкость, но

растворяется в воде, вследствие чего натриевые смазки раскисают во влажной среде. *Литиевое мыло* по тугоплавкости немного уступает натриевому, но зато оно менее растворимо в воде. Высокой влагостойкостью обладают смазки, приготовленные на *кальциевом мыле*, структурный каркас которого стабилизируется водой; однако они неработоспособны при температуре выше 80—100°С: из-за потери воды мыльный каркас распадается и масло отделяется от него. Наибольшую влагостойкость придают смазке твердые углеводородные загустители (парафин, церезин), но они плавятся при низкой температуре [59, 72].

Влияние масла

Некоторые свойства консистентных смазок зависят от входящего в них масла. Так, *морозоустойчивость* или нижняя температурная граница работоспособности смазок зависит от того, насколько низка вязкость и температура застывания масла. Но смазки, содержащие маловязкие масла, хуже выдерживают нагрузки (под нагрузкой отделяют масло). Из-за испаряемости и недостаточной химической стабильности нефтяных масел содержащие их смазки непригодны к длительной работе в условиях высокой температуры, агрессивных сред, вакуума. От природы масла, входящего в состав смазки, зависит прочность граничной пленки на поверхности трения; наилучшим в этом отношении является растительное касторовое масло.

Кроме масел и загустителей в состав некоторых сортов консистентных смазок входят присадки — антиокислительные, стабилизирующие структуру, противоизносные, ингибиторы коррозии [59, 72].

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

Отличия от твердых тел и жидкостей

Своеобразие дисперсного строения пластичных смазок придает им особые механические свойства, отличающиеся от свойств твердых и жидких тел. Так, прочность пластичной смазки в отличие от твердых тел резко зависит от температуры и от времени «отдыха» после предыдущего нагружения, а вязкость в отличие от нормальных жидкостей зависит от скорости течения. Это обусловлено тем, что под действием внешних сил в смазке происходит разрушение связей и деформация кристалликов загустителя (см. на рис. 50 электронмикрофотографии смазки до и после механического воздействия). Восстановление разрушенных связей и исходной структуры каркаса происходит лишь по истечении некоторого времени [17, 59].

Предел прочности

При небольших нагрузках смазка сохраняет свою внутреннюю структуру и деформируется упруго подобно твердому телу (пря-

мая слева на рис. 51). С возрастанием нагрузки структурный каркас смазки начинает разрушаться, она постепенно теряет свойства твердого тела и начинает течь подобно вязкой жидкости. Соответствующее этому переходу максимальное напряжение сдвига называется *пределом прочности* или *пределом текучести* смазки. В обычном рабочем интервале температур он составляет от 1 до нескольких граммов на сантиметр квадратный — в миллионы раз меньше, чем для конструкционных материалов. От предела прочности смазки зависит величина начального усилия сдвига (например, начала

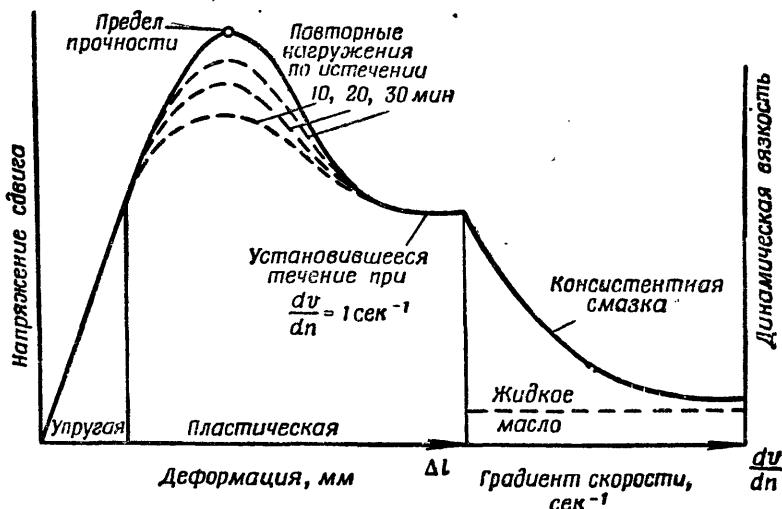


Рис. 51. Схема к определению специфических механических свойств консистентных смазок

вращения подшипника качения), а также ее способность удерживаться в смазываемом узле при воздействии инерционных сил. Так, экспериментально установлено, что смазки сбрасываются центробежными силами с подшипника качения при достижении напряжения сдвига, в четыре раза меньшего, чем предел прочности (напряжение сдвига пропорционально квадрату числа оборотов).

При повторных нагрузлениях до восстановления разрушенных связей предел прочности оказывается ниже, чем при первом нагружении, но с увеличением времени «отдыха» приближается к исходному (штриховые линии на левой части рис. 51). Периодическая прокрутка подшипников, «схватываемых» при низких температурах, может снизить начальное усилие сдвига или предотвратить скалывание смазки. Предел прочности зависит от природы и количества загустителя в смазке, от вязкости масла он зависит мало. Измерение предела прочности производится с помощью *пластометра* (рис. 52), в котором напряжение сдвига

повышается с помощью пресса, использующего силовой эффект термического расширения масла. Предел прочности (текучести) смазки соответствует максимуму показаний манометра [64].

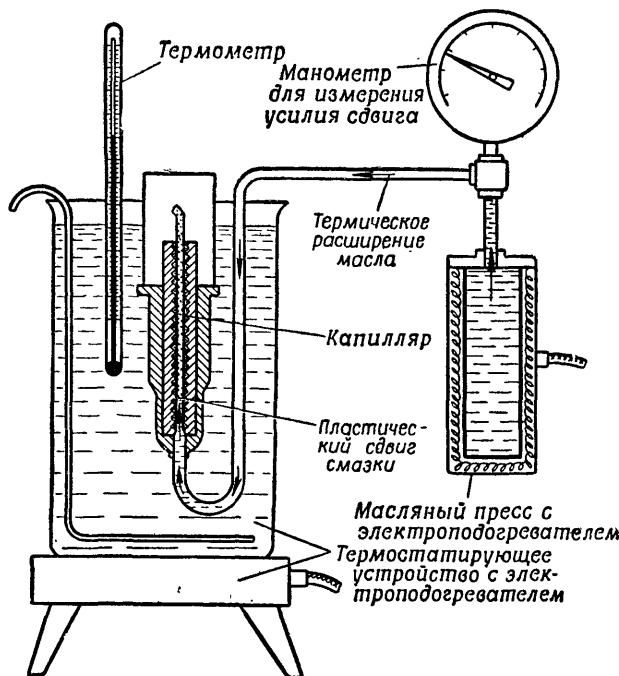


Рис. 52. Схема пластометра для измерения предела прочности консистентной смазки

Вязкость

Когда на смазку действуют усилия, превышающие предел прочности на сдвиг, она течет, и ее свойства характеризуются вязкостью. Величина вязкости при этом отражает не только внутреннее трение между взаимно перемещающимися слоями, но и мгновенное равновесие между процессами разрушения и восстановления каркаса смазки, которое также зависит от скорости взаимного перемещения ее слоев. Поэтому вязкость пластичных смазок уменьшается с ростом градиента скорости сдвига $\frac{dv}{dn}$, происходит более глубокое разрушение структурного каркаса смазки, связи между частицами загустителя ослабляются, частицы ориентируются в направлении движения. При очень большом градиенте скорости течения (рис. 51, справа) связи между частицами загустителя практически разрушаются полностью и смазка уподобляется загущенному маслу.

Вязкостно-температурная характеристика консистентных смазок чрезвычайно пологая, вязкость с понижением температуры растет в сотни и тысячи раз медленней, чем у масел, входящих в их состав. Это объясняется тем, что сопротивление течению смазки обусловлено в основном сцеплением частиц загустителя, которое гораздо слабее зависит от температуры, чем вязкость исходного масла.

От вязкостных свойств консистентных смазок зависят потери на трение в тех подшипниках качения, где они применяются, темп запуска при низких температурах, а также возможность подачи смазок к узлам трения по каналам (мазепроводам). Технические нормы вязкости установлены по верхнему пределу при отрицательных температурах. Испытание производится на *автоматическом вискозиметре*, в котором смазка выдавливается из капилляра пружинным поршнем с переменной скоростью. Наилучшими вязкостными свойствами обладают смазки, состоящие из маловязкого масла и большого количества загустителя. Они сохраняют невысокую вязкость при низких температурах и резко уменьшают вязкость при увеличении скорости сдвига. В результате этого сила трения мало изменяется при значительном изменении условий работы [64].

Пенетрация

Контроль густоты пластичных смазок, в какой-то степени отражающей их структурно-механические свойства, производится путем определения пенетрации — глубины (в десятых долях миллиметра) погружения конуса penetрометра (рис. 53) в смазку за 5 сек под действием веса 150 Г. Чем мягче смазка, тем больше число пенетрации. Пластичные смазки для авиационной техники имеют при 20° С число пенетрации от 170 до 360 [64].

Теплостойкость

К структурно-механическим свойствам пластичных смазок по своей физической сущности относится и их теплостойкость. Предел прочности смазки с повышением температуры уменьшается вплоть до нуля, и смазка приобретает способность течь при очень малых усилиях, в том числе под действием собственного веса. Это объясняется увеличением кинетиче-

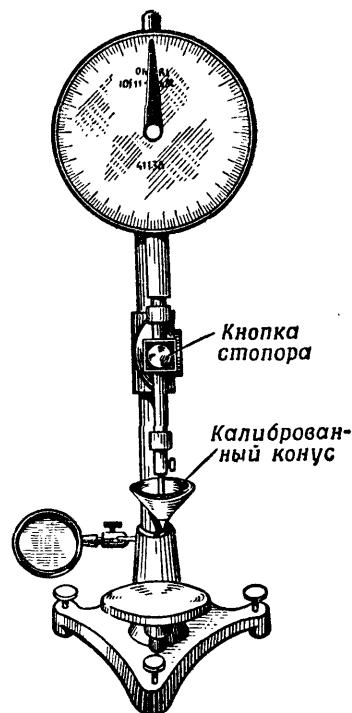


Рис. 53. Пенетрометр

ской энергии частиц загустителя (главным образом в колебательном тепловом движении), результатом чего является разрыв связей между ними и разрушение каркаса. Правда, каркас углеводородных смазок разрушается еще до этого вследствие плавления загустителя, а кальциевых — из-за потери стабилизирующей каркас воды.

Теплостойкость смазок контролируют по *температуре каплепадения*, при которой из смазки, нагреваемой в специальном приборе, выпадает первая капля (рис. 54).

Пластичные смазки применяют при температуре не менее чем на 10—20°С ниже их температуры каплепадения, чтобы избежать вытекания смазки из узла трения. Смазки с температурой каплепадения выше 100°С считаются тугоплавкими, от 65 до 100°С — среднеплавкими, ниже 65°С — низкоплавкими. В марках некоторых смазок теплостойкость указывается соответственно буквой Т, С или Н, стоящей на втором месте.

Наиболее термостойкие смазки не имеют температуры каплепадения. Их загуститель — измельченный до размеров коллоидных частиц силикагель, дисульфид молибдена, графит или сажа — не плавится до очень высоких температур. Весьма малые размеры его частиц обеспечивают преобладание поверхностных сил связи над разрушающим воздействием теплового движения. Верхняя темпера-

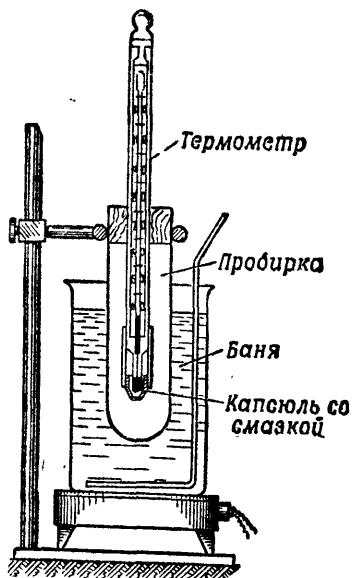


Рис. 54. Прибор для определения температуры каплепадения консистентных смазок

ратурная граница пригодности таких смазок определяется свойствами входящего в них масла [59, 64, 72].

СТАБИЛЬНОСТЬ И ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА КОНСИСТЕНТНЫХ СМАЗОК

Основные понятия

Срок надежного действия смазок в узлах трения, в уплотняемых ими соединениях и при консервации деталей зависит от стабильности и защитных свойств смазок. *Стабильностью* смазки принято считать ее способность сохранять собственную структуру и состав, а *защитными свойствами* — способность предохранять поверхности, на которые она нанесена, от агрессивных агентов. Показателями стабильности и защитных свойств служат те изменения, которые происходят в смазке или защи-

щаемых ею материалах при воздействии различных физических и химических факторов: нагрузок, нагрева и охлаждения, вакуума, воды и ее паров, кислорода и других химически активных веществ, пыли, радиации и т. п. [17, 59].

Физическая стабильность

Коллоидная стабильность оценивается по отделению жидкого масла в % к весу смазки, которую держат под прессом в течение 30 мин. Отпрессованное масло впитывается стопкой бумажных фильтров (их взвешивают до и после испытания). Определение *синерезиса* (так называется явление расслоения в коллоидных системах) производится при свободном истечении масла через бумажный фильтр из воронки со смазкой в течение одних суток после интенсивного перемешивания смазки при температуре 50 или 70°С. При хранении смазки с низкой коллоидной стабильностью в крупной таре значительное количество масла может отпрессоваться из нижних слоев; часть смазки оказывается непригодной. В условиях применения под действием нагрузок такие смазки теряют масло, обогащаются загустителем и становятся неработоспособными.

Испаряемость жидкой фазы смазок также приводит к повышению концентрации загустителя (вплоть до потери пластичности смазки, образования «корки» и растрескивания ее поверхности). Количество выражение испаряемости смазок дается в процентах потери веса смазки в испарителе за 1 час при 120°С. Наихудшими по этому показателю являются смазки, содержащие маловязкое нефтяное масло. Испаряемость смазок усиливается при низком атмосферном давлении в высотных условиях и при обдуве [17, 59].

Химическая стабильность

Оксислению кислородом воздуха подвергается главным образом жидккая фаза смазки — масло. Загуститель играет при этом двойственную роль: он тормозит диффузию кислорода, но катионы металла мыльного загустителя являются катализаторами окисления. Химическую стабильность смазки оценивают путем форсированного окисления смазки при повышенной температуре (а для некоторых смазок и давлении) по увеличению кислотного числа (или уменьшению щелочности), а также по величине снижения давления, которое отражает количество присоединенного кислорода.

Термостабильность смазок как характеристика их работоспособности имеет смысл применительно к тем смазкам, которые становятся непригодными при нагреве ниже температуры каплепадения или вообще не имеют температуры каплепадения. Мыльные загустители, приготовленные из плохо очищенных синтетических жирных кислот, вызывают термоупрочнение (желатинизацию) смазки — превращение ее в упругое твердое тело, способное вывести из строя подшипники качения. Окисление неоргани-

ческих загустителей — графита при 500° С, дисульфида молибдена при 425° С — вызывает распад смазки [58, 59, 64].

Радиационная стойкость

У обычных смазок начальная стадия облучения (суммарная доза порядка $1 \cdot 10^8$ — $2 \cdot 10^8$ рад) приводит к деструкции загустителя, разрушению каркаса, размягчению или даже разжижению и стеканию смазки. Большие дозы облучения (порядка 10^9 — 10^{10} рад) инициируют интенсивное окисление и полимеризацию жидкой фазы, в результате чего авиационные смазки, содержащие нефтяные или поликсилоксановые масла, превращаются в твердую хрупкую массу. Металлы, содержащиеся в мыльных смазках (прежде всего натрий), при облучении приобретают наведенную радиоактивность [17, 32].

Защитное действие

Способность смазки защищать поверхность материала от атмосферных и других разрушающих агентов обусловлена как изолирующими, так и активным ее действием. Она зависит от характеристик стабильности, рассмотренных выше, а также от влагостойкости и водонепроницаемости смазки, отсутствия в ней механических примесей и коррозионноактивных веществ, наличия нейтрализующих веществ и ингибиторов коррозии.

Механические примеси при контакте с водой способствуют возникновению электрохимической коррозии; металлические частицы могут играть роль катализатора окисления самой смазки. В антифрикционной смазке совершенно недопустимы абразивные частицы, способные царапать детали, так как смазка в процессе применения не фильтруется. Внешнее попадание пыли разрушает мыльные смазки: пыль адсорбирует и впитывает масло, слой смазки засыхает и отстает. Механические примеси в смазке легко обнаружить на ощупь, перетирая ее между пальцами. Количество их определяют путем растворения и фильтрации смазки [17, 53, 72].

Антикоррозионное действие

Специфичным для смазок является небольшой избыток свободной щелочи: она нейтрализует коррозионноактивные кислые продукты, образующиеся при длительном хранении. Некоторые смазки тормозят электрохимическую коррозию, выделяя на поверхности металла ингибиторы, которые поляризуют (изолируют) катодные или анодные участки гальванических микрэлементов. Наконец, антикоррозионный эффект смазок может быть обусловлен ингибиторами, образующими обычную защитную коррозионную пленку. При правильном подборе смазки могут обеспечить лучшее предохранение материалов от коррозии, чем окраска и другие способы защиты [59].

Сползание

Прилипание смазок к поверхности металла (*адгезия*) обычно прочнее, чем внутренняя связь между частицами смазки. Внутренние же связи достаточны, чтобы однородная смазка до определенной температуры не текла под действием собственного веса. Сползание смазок с вертикальных поверхностей может происходить при температуре примерно на 20°С ниже точки каплепадения. Причиной этого является *пристенный синерезис* — повышение концентрации жидкого масла в ультратонком слое смазки у стенки. Под действием веса смазки и адсорбционных сил поверхности вблизи стенки возникают деформации каркаса смазки, возрастают микрополости, появляются микротрешины. Они заполняются жидким маслом, по слою которого и соскальзывает прилегающий извне слой пластичной смазки. Температуру сползания нужно учитывать при выборе защитных смазок в условиях жаркого климата, а также при размещении деталей и материалов долговременного хранения в складских помещениях. Смазку не следует наносить слишком толстым слоем [17].

АНТИФРИКЦИОННЫЕ СМАЗКИ

Смазка ЦИАТИМ-201

Антифрикционные консистентные смазки служат для уменьшения трения и износа в узлах управления самолетом и двигателем, узлах крепления шасси и механизмах его уборки, подшипниках колес и различных электроагрегатов, механизмах вооружения, спецоборудования, приборов. При этом из соображений удобства обслуживания по возможности используется один и тот же универсальный сорт смазки, работоспособный в широком диапазоне эксплуатационных условий — смазка ЦИАТИМ-201. Эта смазка представляет собой продукт загущения маловязкого приборного масла МВП влагостойким, теплостойким литиевым мылом (стеаратом лития) и содержит антиокислительную и одновременно стабилизирующую присадку — дифениламин (0,3%). Обычно цвет смазки желтый. Предел прочности при 50°С должен быть не менее 2,5 Г/см². Температура каплепадения этой смазки не ниже 170°С, диапазон рабочих температур практически от —60°С до +140°С, а при длительной работе до +90°С.

В связи с низкой вязкостью входящего в нее масла смазка ЦИАТИМ-201 при повышенной температуре склонна к синерезису — выделению жидкого масла. Ее следует хранить в прохладном помещении в мелкой таре, чтобы масло не выжималось под давлением вышележащих слоев смазки (обычная расфасовка по 850 г). Из тонкого слоя смазки (особенно на открытых поверхностях) масло МВП испаряется, смазка «высыхает», оставшаяся масса литиевого мыла не обеспечивает нормальной работы узлов трения; этим же обусловлена непригодность ее для длительной

работы при температуре выше 90° С. Защитные свойства смазки невысокие — смазка влагопроницаемая.

В тех узлах трения, где температурный режим или удельное давление выше, чем может выдержать смазка ЦИАТИМ-201, применяют сорта смазок с более высокой теплостойкостью или повышенной прочностью граничной пленки. Для приборов и специального оборудования применяют смазки повышенной стабильности [59, 65, 72].

Смазка НК-50

В подшипниках колес самолетов, где температура при пробеге достигает 160—180° С, и в клапанных механизмах поршневых двигателей применяют смазку НК-50 с температурой каплепадения не ниже 200° С. Ее также используют как средство против наклела и пригорания в сильно нагруженных и нагретых шлицевых и резьбовых соединениях. Смазка НК-50 густая, черного цвета с зеленоватым оттенком. Она состоит из вязкого авиационного масла МК-22, натриевого мыла (невлагостойкого, но еще более теплостойкого, чем литиевое) и 0,5% коллоидного, очень тонко измельченного графита. Чешуйки графита обеспечивают высокую прочность смазочной пленки и предохраняют от сухого трения металла о металл при больших нагрузках и высокой температуре. Кратковременно (до нескольких часов) обеспечивается нормальное состояние смазанных ею узлов даже при температуре 400° С.

Смазка НК-50 имеет существенные недостатки: при повышенной влажности она набухает, размягчается и сползает с деталей, а при низких температурах затвердевает и скальвается. В связи с этим необходимо систематически наблюдать за узлами трения, работающими на смазке НК-50, и по мере необходимости возобновлять или заменять ее. Зимой при температуре ниже —25° С вместо чистой смазки НК-50 в подшипниках колес самолетов применяют более морозостойкую смесь смазок НК-50 и ЦИАТИМ-201 в соотношении 3:1 (этот состав имеет наименьший предел прочности, ниже чем чистая ЦИАТИМ-201). Перед смешением разрешается нагревать смазки до температуры не выше +60° С. Смазку НК-50 и смесь ее со смазкой ЦИАТИМ-201 хранят в герметичной таре в сухом помещении; содержание воды в смазке не должно превышать 0,3% [59, 65, 72].

Термостойкие смазки

Для узлов трения, расположенных в горячей зоне вблизи двигателей, наиболее пригодна смазка ЦИАТИМ-221 (внешне она напоминает смазку ЦИАТИМ-201, но более мягкая). Она получается путем загущения этилполисилоксановой жидкости, выдерживающей температуру до 300° С, кальциевым комплексным мылом — стеарат-ацетатом кальция (ацетат кальция обеспечивает стабильность кальциевого мыла при высокой температуре). Предел прочности этой смазки при 50° С не менее 1,2 Г/см², температура каплепадения выше 200° С. В ус-

ловиях еще более высоких температур и контакта с горячими газами может работать смазка *ПФМС-4с* темного цвета — продукт загущения весьма стабильной против окисления полиフェнилметилсиликсановой жидкости графитом и пигментным загустителем. Испарение жидкости при температуре выше 400°С не приводит к отказу в работе механизмов, не имеющих скоростных узлов трения, загуститель продолжает выполнять в них смазочные функции примерно до 500° С [59, 65, 70, 72, 96].

Смазки противоизносного действия

Для подшипников поворотных лопастей воздушного винта изменяемого шага, испытывающих высокие удельные давления, используется смазка *1-13* желтого или коричневого цвета. Она состоит из нефтяного масла средней вязкости, загущенного кальциево-натриевым мылом, приготовленным на основе касторового масла. Такое мыло отличается способностью хорошо прилипать к металлу. Температура каплепадения смазки не ниже 120°С, максимальная рабочая температура 100—110°С. При низкой температуре смазка работоспособна примерно до —40° С. По влагостойкости из-за наличия натриевого мыла она уступает литиевым и чисто кальциевым смазкам.

Для узлов крепления ротора вертолетов, где удельное давление еще выше, предназначена смазка *ЦИАТИМ-203* темно-коричневого цвета. Она обладает не только высокой прочностью граничной смазочной пленки, но и химической активностью, предохраняющей металл от задира. Смазка эта готовится на основе трансформаторного масла, предварительно загущенного виниполом. Загустителем же самой смазки является более липкое, чем в смазке *ЦИАТИМ-201*, литиевое мыло, приготовленное на основе осерненного кашалотового жира и осеренных нафтеновых кислот. Температура каплепадения смазки *ЦИАТИМ-203* не ниже 150° С. Противозадирные свойства смазки, кроме серы (ее должно быть не менее 0,2%), обеспечиваются присадкой трифенилфосфата (0,5%). По коллоидной стабильности смазка *ЦИАТИМ-203* лучше, чем *ЦИАТИМ-201*, вследствие меньшей подвижности жидкой фазы, но вязкость ее при низкой температуре выше.

Сильно нагруженные узлы, совершающие возвратно-поступательное движение, меньше изнашиваются при использовании *металлопакирующих смазок*, содержащих металлическую пудру (например, смазка *ЦИАТИМ-203* с добавкой 10% свинцового порошка и др.). Они наволакивают защитное покрытие и выбирают люфты, образующиеся в результате износа основного материала. Свинцовый порошок в составе смазки наиболее эффективен при трении стали по бронзе, бронзовый порошок — при трении стали по стали.

Высоконагруженные редукторные и червячные механизмы рулевого привода и уборки шасси тяжелых самолетов работают на смазке *ЦИАТИМ-208* темно-

коричневого цвета. При положительных температурах она представляет собой вязкую жидкость, а при отрицательных имеет обычную консистенцию пластичных смазок. Состоит она из смеси неочищенных нефтяных масел (осевого, применяемого для железнодорожного подвижного состава, и нигрола, используемого в трансмиссиях автомобилей и тракторов) с загустителем — кальциевым мылом осерненных нафтено-кислот и окисленного петролатума. Все компоненты этой смазки обладают высокой липкостью, а содержащаяся в ней сера является главным носителем ее противозадирных свойств. Смазка ЦИАТИМ-208 работоспособна в интервале температур от -40 до 100°C .

В приводе авиационных стартер-генераторов, узлах подвески двигателей, а также для смазки тросов в гибкой оболочке применяется *графитная смазка УСсА* — продукт загущения нефтяного масла повышенной вязкости кальциевым мылом и 10% чешуйчатого графита. Из-за низкой теплостойкости кальциевого мыла максимальная рабочая температура этой смазки порядка 65°C (температура каплепадения не ниже 77°C). Смазка пригодна только для грубых механизмов — содержащиеся в чешуйчатом графите механические примеси вызывают значительный износ смазываемых узлов [18, 65, 96].

Приборные смазки

Для авиационных приборов и специального оборудования предназначены пластичные смазки ОКБ-122 различных марок. В их состав входят весьма стабильные при длительной работе низкозагустывающие полисилоксановые масла ОКБ-122 и влагостойкие загустители — стеарат лития и другие негигроскопичные мыла и церезин. Подобно соответствующим маслам они работоспособны при очень низких температурах (-70°C и ниже). Верхний предел их рабочей температуры определяется теплостойкостью загустителя: 140°C для сортов ОКБ-122-7 и ОКБ-122-7-5, 70°C для сортов ОКБ-122-8 и ОКБ-122-12. Смазки ОКБ-122-7 и ОКБ-122-12 отличаются прочностью границной пленки, их применяют для червячных и других нагруженных механизмов автоматики управления самолетом и электроприводов. Смазка ОКБ-122-7-5 с малым пределом прочности и низкой вязкостью идет на высокооборотные слабо нагруженные узлы гиromеханизмов. Смазка ОКБ-122-8 используется в других узлах прицельного и радиотехнического оборудования и приборах. Для фотоборудования, автопилотов, компасов предназначена смазка 2ЦПК, состоящая из масла МВП и церезина с добавкой костного масла [59, 81].

Смазки для агрессивной среды

Особые смазки предназначаются для высокоскоростных узлов трения, работающих в контакте с агрессивными компонентами. Их готовят из синтетических масел — диэфирных, фторуглеродных или

фторхлоруглеродных. Например, мягкая, маловязкая при работе смазка *ВНИИ НП-223* на основе диоктилсебацината, загущенная натриевым мылом и нитритом натрия, обеспечивает смазывание подшипников качения с числом оборотов в минуту до 60 000. Температура каплепадения ее не ниже 175°С; смазка ядовита [17, 59, 72, 96].

УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ СМАЗКИ

Смазка БУ

Для уплотнения и герметизации соединений и кранов топливной, масляной и гидравлической систем применяется бензиностойкая уплотнительная смазка БУ. Она состоит из окисленного касторового масла и цинкового мыла, приготовленного на касторовом масле, а также небольшого количества глицерина (4%). Смазка эта не растворяется углеводородами и хорошо прилипает к металлу; низкоплавкая (температура каплепадения 55° С). Зимой смазка БУ загустевает, перед насыщением ее рекомендуется разбавлять спиртом (до 25%) [59, 72].

Смазка МГС

Для уплотнения кранов, сальников и резьбовых соединений противообледенительной системы и других устройств, в которых находится спирт, глицерин или вода, применяется смазка МГС серого цвета. Она состоит из трансформаторного масла и бариевого мыла, нерастворимого в воде и других полярных жидкостях. Температура ее каплепадения 110° С; смазка более мягкая, чем БУ. Она нестойка к воздействию топлив и масел. Из-за низкой коллоидной стабильности смазка МГС примерно через полгода становится непригодной [72].

Смазка ЦИАТИМ-205

Для резьбовых соединений трубопроводов и арматуры, контактирующих с агрессивными компонентами, используется смазка ЦИАТИМ-205, приготовляемая из нефтяных масел высшей очистки (вазелинового медицинского и парфюмерного) и церезина (43—47%). Она предохраняет соединения и краны от спекания. Смазка относительно низкоплавкая (температура каплепадения 65° С), белая или светло-кремовая. Отличается особой влагонепроницаемостью, при одинаковой толщине слоя она пропускает примерно в 100 раз меньше влаги, чем смазка ЦИАТИМ-201 [17, 72].

СМАЗКИ ДЛЯ КОНСЕРВАЦИИ

Внешняя консервация

Защитные смазки для внешней консервации техники, отдельных деталей и материалов должны быть вязкими и способными хорошо

удерживаться на смазываемой поверхности, весьма влагостойкими и влагонепроницаемыми, стабильными при обычной температуре. Температура плавления их должна быть достаточно низкой, чтобы обеспечить возможность простого нанесения на защищаемую поверхность в разогретом состоянии (пульверизатором, кистью, окунанием).

Широко используемые для внешней консервации *пушечная смазка УНЗ* (универсальная низкоплавкая защитная) и *технический вазелин УН* (универсальная низкоплавкая смазка) представляют собой продукт сплавления нефтяного масла повышенной вязкости с твердыми углеводородами — петролатумом, церезином, парафином (количество загустителя до 75%). В пушечную смазку добавляется около 0,02% натриевой щелочи. Щелочь нейтрализует образующиеся при длительном хранении кислые продукты, опасные в отношении коррозии стали; сама же она на сталь не действует. Пушечная смазка применяется для консервации стальных изделий, не имеющих лакокрасочных покрытий. Технический вазелин, не содержащий щелочи, идет главным образом для консервации изделий из цветных металлов (оцинкованных, кадмированных и других изделий с покрытиями) и для нанесения на полихлорвиниловые консервационные чехлы. Обе смазки влагостойкие, влагопроницаемость их примерно в 10 раз меньше, чем смазки ЦИАТИМ-201. Эффективность нанесенных покрытий — от 1—2 лет на открытом воздухе до нескольких лет в складских условиях.

Пушечная смазка и технический вазелин плавятся при сравнительно низких температурах (50—55°C), причем температура сползания их с вертикальной поверхности может быть еще ниже (32—36°C). Хотя при сползании остается тонкий непрерывный слой на смазываемой поверхности, он не достаточен для защиты от атмосферной коррозии. Улучшенная *пушечная смазка ПВК* содержит 1% присадки МНИ-7 (окисленного церезина), которая повышает на 12—15°C температуру сползания и уменьшает влагопроницаемость. Изделия под этой смазкой хранятся без появления коррозии в несколько раз дольше, чем под пушечной смазкой УНЗ. Несомненны преимущества смазки ПВК в условиях тропического климата.

Надежную защиту от коррозионного воздействия воды, в том числе морской, обеспечивает *смазка АМС-3*, состоящая из высоковязкого масла и алюминиевого мыла. Она более теплостойкая, чем вазелин и пушечная смазка (температура каплепадения 95°C), обладает большой липкостью [17, 53, 65].

Внутренняя консервация

Для внутренней консервации систем и полостей двигателей и их агрегатов удобнее жидкые консервационные смазки, содержащие небольшое количество загустителя, но активированные различными присадками. Они обеспечивают защиту от кор-

розионноактивных веществ, содержащихся в остатках отработавшего масла, специальной жидкости, топлива, а также в осадке, нагаре и т. п. Для обеспечения простой экспонсервации они должны растворяться в рабочих жидкостях соответствующих устройств и систем. Как и все консервационные смазки, они должны быть липкими и стабильными.

Широкое применение имела смазка К-15 — маслянистая темно-коричневая жидкость, которая состоит из масел МС-20 (55—60%) и трансформаторного (до 40%), загущенных влагостойким литиевым мылом (около 2%). В нее входит синтетический каучук (1%) для лучшего образования пленки и присадка ЦИАТИМ-339 (1%), содержащая соединения фенолов с серой и барием. Присадка действует на металл, способствуя образованию защитной пленки, нейтрализует кислые органические продукты, а также препятствует осаждению на поверхностях продуктов окисления и разложения масла или топлива. Смазка К-15 может использоваться и для вспышей консервации двигателей.

Смазки К-17 и К-19 (*K-17н*) отличаются от смазки К-15 содержанием антиокислительной присадки — дифениламина (0,3%) и дополнительных антикоррозионных присадок — сульфоната кальция (10% в присадке К-17) или нитрита натрия (2% в присадке К-19). Последний эффективен в условиях повышенной температуры и высокой влажности, при которых составные части смазок К-15 и К-17 не обеспечивают достаточной защиты от коррозии. В качестве заменителя — резервной консервационной смазки для внутренних полостей двигателей — можно использовать масло МС-20 или МК-22, загущенное 6—10% церезина [59, 65, 72].

Глава 11

ТЕХНИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ

Техническими или специальными жидкостями в авиации принято называть все жидкые продукты различного состава, за исключением топлив и смазочных материалов, обеспечивающие работу авиационной техники. К их числу относятся рабочие жидкости гидравлических систем и устройств — *гидромасла*, самолетные *антиобледенительные* жидкости, жидкые *огнегасящие* составы, *охлаждающие* жидкости для двигателей, систем кондиционирования воздуха и другого самолетного оборудования. Можно также к ним отнести жидкости для наземного обслуживания авиационной техники — для борьбы с наземным льдообразованием, для промывки систем, технологические растворители, которые используются при регламентных работах и ремонте и др. Примерная схема классификации специальных жидкостей дана на рис. 55.

Иногда не совсем точно относят к специальным жидкостям антиобледенительные, антидetonационные и другие присадки к топливу, жидкые присадки к маслам и т. п. Такие жидкости, не используемые индивидуально, целесообразно рассматривать как составную часть топлив и масел.

Химический состав технических жидкостей подобран таким образом, чтобы в максимальной степени удовлетворить специфическим условиям работы устройств различного назначения [59, 72].

ЖИДКОСТИ ДЛЯ ГИДРОУСТРОЙСТВ САМОЛЕТОВ И ВЕРТОЛЕТОВ (ГИДРОМАСЛА)

Условия работы

Самолетные гидропередачи, обеспечивающие управление рулями и элеронами, подъем и выпуск шасси, закрылков и воздушных тормозов, управление узлами силовой установки, вооружения, радиотехнического оборудования, торможения колес, а также гидро-пневматические амортизаторы шасси рассчитаны, как правило, на применение единой рабочей жидкости — гидромасла. В отдельных случаях исходя из удобства расположения соответ-

ствующих гидроустройств в качестве рабочей жидкости попутно используются топлива и смазочные масла (главным образом в гидравлической автоматике двигателя и воздушного винта).

Типичная схема гидросистемы самолета с указанием характерных условий работы ее узлов — давления, температуры, контакта

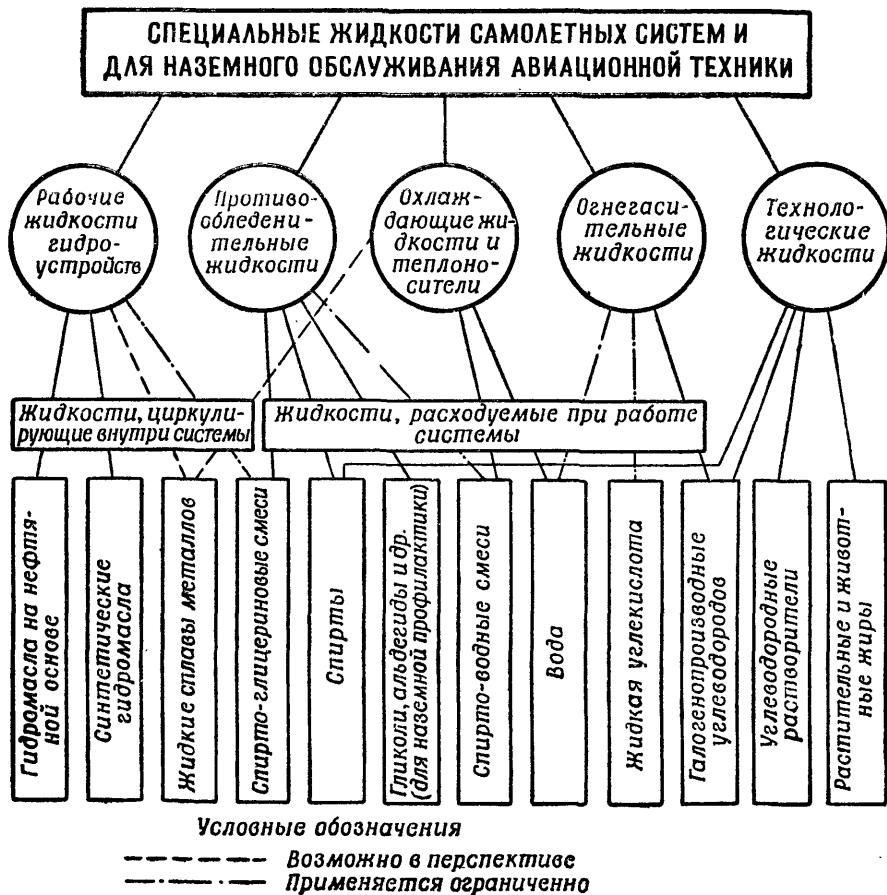


Рис. 55. Классификация специальных жидкостей для авиационной техники

рабочей жидкости с газами — представлена на рис. 56 (из большого числа исполнительных магистралей на схеме в виде примера показана только одна — магистраль бустера стабилизатора). Рабочая жидкость находится в достаточно сложных условиях: давление в системе примерно до 200 атмосфер, а при работе некоторых гидроагрегатов оно иногда резко повышается до 250—400 атмосфер, температура жидкости может колебаться от минимальной температуры наружного воздуха -60°C до $100-150^{\circ}\text{C}$ и выше, обусловленной трением при работе гидроустройств,

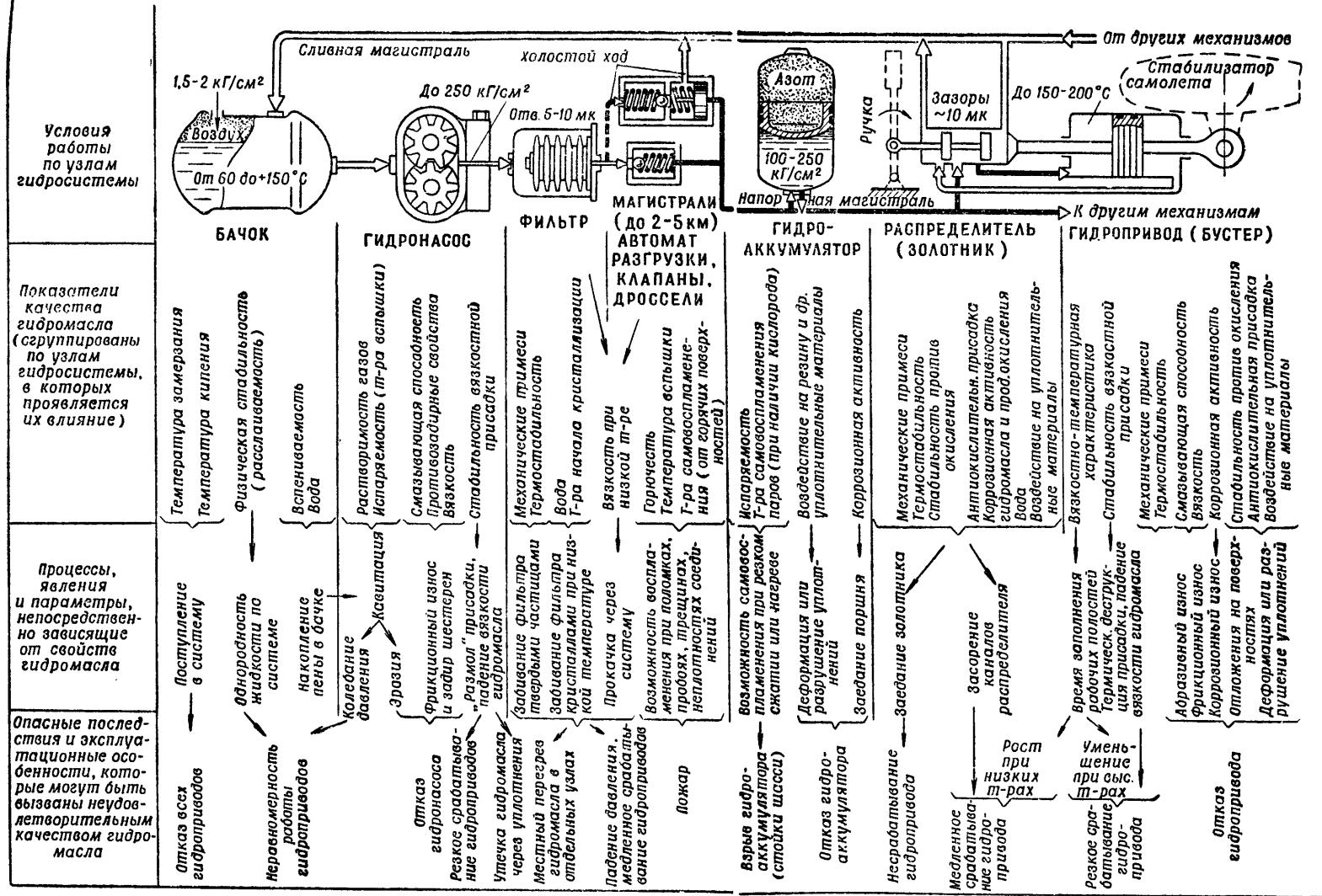


Рис. 56. Свойства гидромасла, влияющие на эксплуатационную надежность гидросистемы самолета

аэродинамическим нагревом самолета, теплопередачей от двигателя. Кратковременно давление в гидропневматических амортизаторах шасси при посадке некоторых самолетов достигает 1000 атмосфер; при этом жидкость соприкасается с резко нагревающимся газом.

Чтобы предотвратить окисление и взрыв паров рабочей жидкости (если она горючая) в амортизаторах и в поршневых гидроаккумуляторах (рис. 56), обычно применяется химически инертный азот; следует иметь в виду, что технический азот часто содержит несколько процентов кислорода. В бачках, наддуваемых от компрессора двигателя, над жидкостью находится воздух, кислород которого в некотором количестве растворяется в ней. Рабочая жидкость имеет большую относительную площадь контакта с металлическими стенками, резиной и прокладочными материалами, поскольку количество ее невелико (от нескольких литров до нескольких десятков литров), а поверхность внутренних полостей, в особенности гидравлических магистралей, значительна (на некоторых типах самолетов длина магистралей достигает нескольких километров) [63].

Основные требования

Для обеспечения достаточно быстрой реакции гидроустройств и работоспособности их в широком диапазоне температур жидкость для них должна иметь невысокую вязкость, пологую вязкостно-температурную характеристику, высокую температуру кипения и низкую температуру замерзания. Для обеспечения же плавности движения деталей гидроагрегатов, предотвращения перетекания и потерь через уплотнения желательна высокая вязкость жидкости. Следовательно, выбор вязкости жидкости для гидроустройств, как и выбор вязкости смазочных масел, должен быть компромиссным. Считается, что в рабочем диапазоне температур вязкость жидкости не должна выходить из пределов 8—1500 сст.

Жидкость не должна разлагаться, расслаиваться или выделять какие-либо вещества, способные засорить каналы гидроустройств, в том числе и при высоких температурах, т. е. должна быть термостабильной. Она должна быть безопасной в отношении коррозии металлов, набухания и разрушения резиновых, пластмассовых и кожаных уплотнений, шлангов и т. д. Поскольку она играет роль смазочного материала для трущихся деталей гидроустройств, желательно, чтобы она обладала хорошей смазывающей способностью (липкостью). В ней не должно быть легкокипящих составных частей как с точки зрения предотвращения потерь, так и в связи с возможным появлением паро-воздушных пробок во избежание неравномерной работы или отказа гидроустройств. Желательно, чтобы жидкость была негорючей, а пары ее — взрывобезопасными.

На том же рис. 56 перечислены свойства гидромасла, влияющие на работоспособность и эксплуатационную надежность гидро-

оборудования, и отмечены возможные последствия неудовлетворительного качества гидромасла. Однако удовлетворить одновременно всем требованиям реальное гидромасло (так же как топливо и смазочное масло) не может. Практически в качестве гидромасла применяют такие жидкости, которые удовлетворяют наиболее важным требованиям [59].

Гидромасло АМГ-10

В гидроустройствах самолетов в основном применяется гидромасло АМГ-10 — авиационное масло гидравлическое с вязкостью не ниже 10 сст при температуре 50°С, окрашенное в красный цвет. Оно получается путем загущения тяжелой малопарафинистой керосиновой фракции, выкипающей в пределах примерно 210—320°С, высокомолекулярным полимером — винилополом подобно тому, как получаются загущенные смазочные масла (см. рис. 43). Этим достигается достаточно высокий уровень вязкости при положительных температурах в сочетании с пологой вязкостно-температурной характеристикой и очень низкая температура застывания гидромасла (ниже —70°С). Благодаря этому обеспечивается нормальная работа гидроагрегатов как при высокой, так и при низкой температуре. Смазывающая способность гидромасла АМГ-10 вполне достаточна для предотвращения износа гидроустройств. Для обеспечения стабильности в течение длительного срока службы (двух-трех лет) из нефтяной основы гидромасла АМГ-10 удаляются непредельные углеводороды и добавляется антиокислительная присадка.

Из гидромасла АМГ-10 удалены в основном ароматические углеводороды; поэтому оно в меньшей степени, чем другие нефтяные жидкости, вызывает набухание и разъедание резины и кожи. Кроме того, шланги, уплотнения, манжеты гидроустройств выполнены из маслостойкой резины. Однако при длительной работе (обычно более двух лет) из-за износа и растворения составных частей резины в жидкости иногда появляются сгустки, которые могут привести к отказу гидроустройств. Поэтому необходимо своевременно, в установленные сроки, заменять жидкость. Другое изменение, происходящее в гидромасле АМГ-10 при эксплуатации, — снижение его вязкости из-за постепенной деструкции («размола») вязкостной присадки. Оно приводит к слишком грубой работе механизмов, например к резкому срабатыванию тормозов, а в некоторых случаях к перетеканию его внутри гидроустройств или к внешней утечке. Если вязкость снижается ниже 8 сст, гидромасло следует заменять, не дожидаясь истечения установленного срока службы.

Неполадки в работе гидроустройств (медленная реакция тормозов, задержка выпуска и уборки щитков и шасси) могут быть связаны с выделением из жидкости растворенной воды, попавшей туда из воздуха, и замерзанием ее на фильтре, в редукционных клапанах гидросистемы, золотниках и т. д. Несмотря на предосто-

рожности при заправке (в каждом бидоне оставляют последние 150—200 мл, где может содержаться отстой воды), вода в гидромасле может появиться в процессе эксплуатации вследствие растворения влаги воздуха, контактирующего с жидкостью в гидробачке. Поэтому необходим периодический контроль отсутствия воды в нижних точках гидросистем.

Существенными недостатками гидромасла на нефтяной основе являются его огнеопасность и недостаточная для перспективных самолетов термостабильность. При повреждении гидросистемы самолета попадание гидромасла на горячие детали двигателя вызывает его воспламенение, что может привести к пожару. Опасность усугубляется тем, что выброс гидромасла происходит под высоким давлением. Длительное воздействие высокой температуры (более 150° С) вызывает появление твердого осадка (такого же, как в топливах). Попадание частиц его в зазоры золотниковых и других регулирующих устройств может привести к отказам в работе гидроприводов, в зазоры силовых узлов — к их преждевременному износу, а отложение на фильтрах — к замедлению срабатывания гидромеханизмов [59, 66, 72, 81].

Высокотемпературные жидкости

Чтобы гарантировать надежность работы гидросистемы при высоких температурах, в последнее время за рубежом разрабатываются термостабильные *кремнийорганические гидромасла*. По температуре застывания и вязкостно-температурной характеристике они превосходят нефтяные гидромасла, а по термостабильности значительно лучше их: есть образцы, длительное время выдерживающие температуру 200° С и выше. Недостаточная смазывающая способность кремнийорганических гидромасел может отразиться на сроке службы шестеренчатых насосов и других гидромеханизмов, в которых имеются высокие контактные давления при трении. Чтобы предотвратить их быстрый износ, к некоторым кремнийорганическим жидкостям добавляется диэфирное масло, которое обладает высокой смазывающей способностью, достаточной термической стабильностью и не вызывает существенного ухудшения вязкостно-температурной характеристики. Такой состав имеет гидромасло 7-50С-3.

Из-за дальнейшего ужесточения температурных условий работы гидросистем в перспективе могут потребоваться жидкости, работоспособные до температуры 500—700° С. Вряд ли они могут быть получены на органической основе. Оригинальным решением проблемы может быть использование в качестве рабочей жидкости *эвтектического сплава щелочных металлов* с отрицательной температурой плавления. Такие сплавы обладают очень высокой температурой кипения и не разлагаются в жидком состоянии; вязкость их близка к вязкости воды. Очень большим их недостатком является бурная реакция с водой, необходимость строгой герметичности и заполнения системы инертным газом во избежание окисления сплава [40, 59, 70, 81, 96].

АВИАЦИОННЫЕ АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫЕ И ОХЛАЖДАЮЩИЕ ЖИДКОСТИ

Условия работы и требования

В полете при отрицательных температурах в условиях высокой влажности атмосферы взвешенные в ней переохлажденные водяные капли (их температура может быть значительно ниже 0°C , до -20°C и даже до -40°C) при соприкосновении с поверхностью самолета или вертолета мгновенно кристаллизуются и прилипают к ней — самолет обледеневает. Обледенение может также происходить при попадании сильно охлажденного самолета в зону теплого воздуха (в результате конденсации паров и образования инея).

Одним из способов борьбы с обледенением самолетов и вертолетов является подача антиобледенительной жидкости на участки, обледенение которых представляет наибольшую опасность или идет наиболее интенсивно (стекла кабин, лопасти несущего винта вертолета). Жидкость поступает к защищаемым деталям через мелкие отверстия в специально подведенных трубках, куда она подается электронасосом. Расход ее обычно составляет несколько литров в час.

Главные требования к антиобледенительной жидкости — низкая температура замерзания как в натуральном виде, так и в смеси с водой, способность легко растворять лед и воду, хорошо смачивать поверхности металла и стекла, достаточная подвижность при низких температурах [59, 81].

Этиловый спирт

В качестве антиобледенительной жидкости преимущественно для стекол кабины используется главным образом *ректифицированный этиловый спирт*. Его применяют прежде всего потому, что он полностью удовлетворяет указанным выше общим требованиям и, кроме того, прозрачный, бесцветный, отличается очень низкой температурой замерзания (-114°C). Смеси его с водой также не замерзают при достаточно низких температурах (рис. 57). Спирт хорошо смачивает металл и стекло, обеспечивая образование на них тонкой поверхностной пленки; хорошо растворяет лед; стабилен, не загрязняет стекол кабин. В процессе образования спирто-водного раствора возникают электростатические связи между полярными молекулами спирта и воды. При этом выделяется тепло, раствор нагревается, объем его уменьшается (рис. 57). Так, если смешать 60 л безводного спирта с 40 л воды, то после охлаждения до температуры 20°C будет не 100 л, а лишь 93,31 л (на 3,69 л меньше).

Абсолютный (100%) этиловый спирт кипит при 78°C , плотность его 0,789. В результате уменьшения объема при смешении с водой плотность спирто-водных растворов оказывается выше

среднеарифметической, подсчитанной по их составу (рис. 57). Определенная экспериментальным путем зависимость между составом и плотностью спирта, которая была впервые установлена Д. И. Менделеевым, позволяет измерить крепость спирта (процентное по объему количество чистого C_2H_5OH , вошедшего в раствор) по глубине погружения спиртомера — прибора, выполненного по принципу ареометра (см. рис. 8).

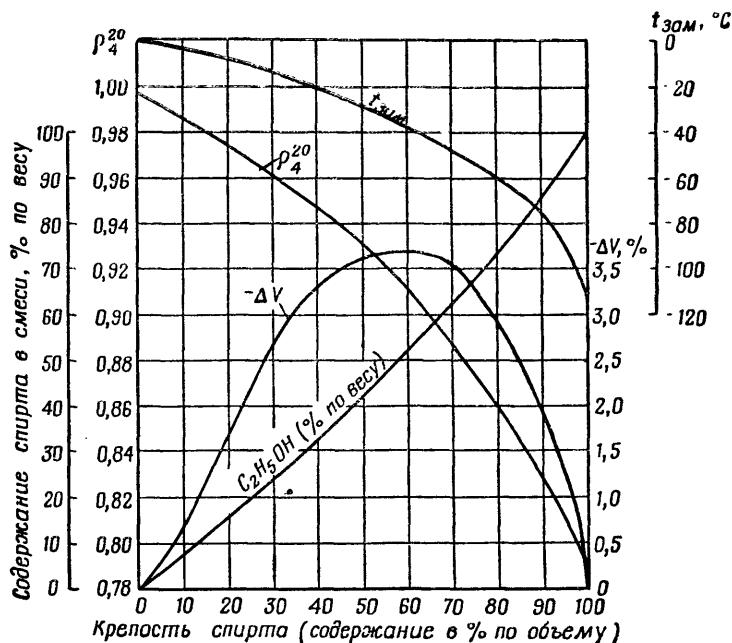


Рис. 57. Плотность p_4^{20} и температура замерзания $t_{\text{зам}}$ смесей этилового спирта с водой; $-\Delta V\%$ — уменьшение объема при смешении (в литрах на суммарные 100 л спирта и воды до смешения)

Ректифицированный спирт, используемый в качестве антиобледенительной жидкости, содержит по объему 95,5—96,0% безводного спирта; получение и сохранение спирта более высокой концентрации представляет технические трудности. Для экономии спирта при учебной подготовке в некоторых случаях применяют спирто-водные смеси различного состава. Основным недостатком этилового спирта как антиобледенительной жидкости является его коррозионная активность (особенно в отношении цинка и алюминия). Если бачки и другие элементы спиртовой системы сделать из алюминиевых сплавов, то при взаимодействии со спиртом образуется студенистая масса алкоголята металлов, забивающая систему. По отношению к стали, железу спирт пассивен. Другим недостатком спирта является его огнеопасность. Кроме того, спирт быстро испаряется; в момент

выхода из отверстий из-за малой вязкости легко сдувается потоком воздуха. Этим затрудняется его использование при борьбе с обледенением лопастей воздушных винтов [59, 72, 86].

Спирто-глицериновая смесь

На вертолетах в качестве антиобледенительной жидкости для несущего винта применяют смесь 85% ректифицированного спирта и 15% глицерина, плотность ее 0,8676. Она отличается от спирта более высокой вязкостью и медленнее испаряется. Благодаря этому она лучше покрывает лопасти ротора вертолета. Температура замерзания этой жидкости не выше -70°C . Однако глицерин, окисляясь, может выделять кристаллы, забивая отверстия.

Для борьбы с обледенением самолетов на земле (образованием инея, примерзанием снега) используется жидкость ЭАФ (эфироальдегидная фракция) с добавкой 5% бензина и жидкость «Арктика» (на основе этиленгликоля) [1, 59].

Охлаждающие жидкости

На современных сверхзвуковых самолетах в качестве охлаждающей жидкости для ряда систем и устройств, требующих непрерывного отвода тепла (маслорадиаторы, охлаждающие рубашки радио- и радиотехнической аппаратуры), используется топливо. Однако на некоторых типах самолетов используется специальный запас охлаждающей жидкости в системе кондиционирования воздуха, поступающего в кабину. Поскольку подаваемый в кабины самолетов сжатый воздух при отборе от компрессора двигателя имеет высокую температуру, его перед поступлением в кабину охлаждают в специальном турбохолодильнике. Этого охлаждения на некоторых типах самолетов недостаточно; перед подачей на турбохолодильник воздух охлаждается в испарителях. Охлаждающей жидкостью в испарителях летом служит дистиллированная вода, а зимой низкозамерзающая смесь 40—50% этилового спирта с 50—60% дистиллированной воды. Она впрыскивается в испаритель, через который проходит змеевик с поступающим в кабину воздухом.

Целесообразность применения именно дистиллированной воды в таких системах обусловлена тем, что вода имеет максимальную из всех жидкостей теплоту парообразования (500—600 ккал/кг в зависимости от температуры). Необходимость предварительной дистилляции (перегонки) связана с наличием в природной воде солей кальция, которые при испарении воды в самолетной системе дали бы отложения («накипь») на змеевике, резко снижающие теплопередачу.

Для нормальной работы водяной или водо-спиртовой системы на высоте в ней нужно создавать избыточное давление. При атмосферном давлении 50 мм рт. ст., соответствующем высоте около

19 км, вода закипает уже при температуре 40° С. Наконец, следует иметь в виду, что вода при 0° С, замерзая, увеличивается в объеме на 10% и образующийся лед разрывает магистрали, полости и т. п. [59].

ОГНЕГАСЯЩИЕ СОСТАВЫ

Способы гашения пламени

Противопожарные системы на самолетах и вертолетах состоят из бачка с огнегасительным составом, магистралей и распылителей, через которые состав выбрасывается для гашения пламени в отсеки двигателей, топливных баков и др. При зарядке бачка в нем создается необходимое для выброса давление газа.

Гашение пламени при пожаре может быть обеспечено различными видами воздействия: изоляцией очага горения от доступа воздуха, разбавлением горящей смеси нейтральным газом до нижнего предела горючести («обеднением» смеси), резким охлаждением факела пламени и, наконец, химическим вмешательством, в частности с помощью конкурирующего с горением процесса, который связывает горючие элементы.

Вода и углекислый газ, предварительно охоженный под давлением более 60 атмосфер, при тушении пожара оказывают все перечисленные виды воздействия, за исключением последнего. Однако огнегасящая концентрация углекислого газа велика (чтобы погасить пламя, его нужно 22% по объему в воздухе); требуемый вес углекислоты (вместе с противопожарным оборудованием) слишком велик. Вода для гашения нефтяных топлив вообще малоэффективна: она вызывает разбрызгивание горящего топлива и способствует распространению пламени, а топливо всплывает на ней и продолжает гореть.

Галогенпроизводные углеводородов

Наиболее подходящими огнегасительными агентами являются бромпроизводные углеводородов. Разлагаясь под действием высокой температуры, они являются источником атомарного брома, который в момент выделения активнее вступает в реакцию с горючими элементами, чем молекулярный кислород воздуха. Теплота окисления водорода и углерода бромом в десятки раз меньше, чем кислородом, температура факела падает, пламя гаснет. Существенную роль играет высокая плотность паров галогенпроизводных углеводородов: они оседают в зоне очага пламени.

Наилучшей из применяемых в настоящее время огнегасительных жидкостей является фреон 114Br — тетрафтордибромэтан¹ C₂F₄Br₂ (активным огнегасительным началом его является бром, фтор остается связанным с углеродным скелетом). Его темпера-

¹ Его марка иногда записывается 114 B₂.

тура кипения 46° С, температура замерзания —112° С; он не оказывает коррозионного действия на материалы.

Широко применяются известные огнегасящие составы «3,5» (смесь 70% бромистого этила C_2H_5Br с 30% жидкой двуокиси углерода CO_2) и «7» (смесь 75% дибромметана CH_2Br_2 , 19% бромистого этила C_2H_5Br и 6% жидкой двуокиси углерода CO_2). Маркировка этих огнегасящих жидкостей цифрами «3,5» и «7» указывает, что их огнегасящая концентрация, и, следовательно, расход в 3,5 раза и в 7 раз меньше, чем углекислоты, принятой за эталон. Недостатком этих составов является коррозионная активность. Все бромпроизводные углеводородов, в том числе фреон 114Br, токсичны. Они обладают еще одним недостатком: длительный контакт их с алюминиевыми сплавами иногда приводит к образованию *пирофоров* (самовоспламеняющихся веществ) триметилалюминия и триэтилалюминия и к опасности самопроизвольного возникновения пожара; огнегасящие составы превращаются в свою противоположность [72, 81].

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенов А. Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. М., изд-во «Транспорт», 1970.
2. Алабин М. А., Кац Б. М., Литвинов Ю. А. Запуск авиационных газотурбинных двигателей. М., изд-во «Машиностроение», 1968.
3. Амелин А. Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. М., изд-во «Химия», 1966.
4. Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. М., Атомиздат, 1969.
5. Баррер М., Жомотт А. и др. Ракетные двигатели. М., Оборонгиз, 1962.
6. Бесслер К. У. Инженерный справочник по управляемым снарядам. М., Воениздат, 1962.
7. Бесполов И. Е., Хайкин М. Д. и др. О влиянии ароматических углеводородов на характеристики горения реактивного топлива. «Химия и технология топлив и масел», № 6, 1969.
8. Блох А. Г. Тепловое излучение в котельных установках. Л., изд-во «Энергия», 1967.
9. Болгарский А. В., Щукин В. К. Рабочие процессы в жидкостных реактивных двигателях. М., Оборонгиз, 1953.
10. Большаков Г. Ф., Гулин Е. И., Торичнев Н. Н. Физико-химические основы применения моторных, реактивных и ракетных топлив, М., изд-во «Химия», 1965.
11. Бортников М. Т., Владимиров В. Д. и др. Авиационные двигатели (сборник справочных материалов). М., Машгиз, 1951.
12. Вайнштейн В. Э., Трояновская Г. И. Сухие смазки и самосмазывающиеся материалы. М., изд-во «Машиностроение», 1968.
13. Вакуров П. С., Синицын В. В. и др. Противоизносные и антифрикционные свойства пластичных смазок. «Химия и технология топлив и масел», № 1, 1969.
14. Варгатик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
15. Васильев А. П., Кудрявцев В. М. и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. М., изд-во «Высшая школа», 1967.
16. Веденеев В. И., Гурвич Л. В. и др. Энергия разрыва химических связей (справочник). М., Изд-во АН СССР, 1962.
17. Великовский В. С., Поддубный В. Н. и др. Консистентные смазки. М., изд-во «Химия», 1966.
18. Виноградов Г. В., Архарова В. В. Основные особенности противоизносных и антифрикционных свойств углеводородов при тяжелых режимах трения. «Химия и технология топлив и масел», № 5, 1960.
19. Виноградов Г. В., Синицын В. В. О свойствах смесей пластичных смазок. «Химия и технология топлив и масел», № 7, 1960.
20. Вредные вещества в промышленности (справочник для химиков, инженеров и врачей). Под ред. Лазарева Н. В., М., Госхимиздат, 1954.
21. Вулис Л. А., Ершин Ш. А., Ярин Л. П. Основы теории газового факела. М., изд-во «Энергия», 1968.
22. Гильберг Л. А. Электрические ракетные двигатели. М., Воениздат, 1968.
23. Гликман Н. Л. Общая химия. М., Госхимиздат, 1957.

24. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества. М., Оборонгиз, 1957.
25. Григорьев А. И. Твердые ракетные топлива. М., изд-во «Химия», 1969.
26. Двигательные установки ракет на жидком топливе. Под ред. Э. Ринга. М., изд-во «Мир», 1966.
27. Дубовкин Н. Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М., Госэнергоиздат, 1962.
28. Еркина Л. И., Фейгин С. А., Агафонов А. В. Оценка перспектив внедрения процесса гидрокрекинга дистиллятного сырья. «Химия и технология топлив и масел», № 3, 1969.
29. Жидкие и твердые ракетные топлива (сборник переводов). Под ред. Шаурова Ю. Х. М., Изд-во иностранной литературы, 1959.
30. Забрянский Е. И., Зарубин А. П. Детонационная стойкость и воспламеняемость моторных топлив. М., изд-во «Химия», 1965.
31. Зайцев А. М., Коросташевский Р. В. Эксплуатация авиационных подшипников качения. М., изд-во «Транспорт», 1968.
32. Заславский Ю. С. Радиационная стойкость смазочных материалов. М., Госатомиздат, 1961.
33. Зельдович Я. Б., Ривин М. А., Франк-Каменецкий Д. А. Импульс реактивной силы пороховых ракет. М., Оборонгиз, 1963.
34. Зрелов В. Н., Пискунов В. А. и др. Образование нагаров на форсунках реактивных двигателей. «Химия и технология топлив и масел», № 12, 1969.
35. Зрелов В. Н., Пискунов В. А. Реактивные двигатели и топливо. М., изд-во «Машиностроение», 1968.
36. Зуидема Г. Г. Эксплуатационные свойства смазочных материалов. М., Гостоптехиздат, 1957.
37. Калайтан Е. Н. Смазочные масла для реактивных двигателей. М., изд-во «Химия», 1968.
38. Квасников А. В. Теория жидкостных ракетных двигателей. Л., Судпромгиз, 1959.
39. Киреев В. А. Курс физической химии. М., Госхимиздат, 1956.
40. Кичкин Г. И., Виленкин А. В. Масла для гидромеханических передач. М., изд-во «Химия», 1969.
41. Климов К. И., Виленкин А. В. Влияние физико-химических свойств смазочных масел на потерю энергии в шестеренчатой передаче. «Химия и технология топлив и масел», № 7, 1957.
42. Климов К. И., Зарудный П. П. Механическая деструкция растворов полиизобутилена в минеральных маслах. «Химия и технология топлив и масел», № 2, 1959.
43. Кобзова Р. И., Тубянская Г. С. и др. Исследование зависимости вязкости от давления для некоторых синтетических масел. «Химия и технология топлив и масел», № 3, 1969.
44. Кожевников А. В. К проблеме получения тяжелых топлив для газотурбинных энергетических установок. «Нефтяное хозяйство», № 9, 1955.
45. Кондратьев В. Н. Кинетика реакций горения газофазных систем. «Физика горения и взрыва», № 4, 1968.
46. Кондратьев В. Н. Кинетика химических газовых реакций. М., Изд-во АН СССР, 1958.
47. Корлисс У. Р. Ракетные двигатели для космических полетов. М., Изд-во иностранной литературы, 1962.
48. Копршак В. В., Колесников Г. С. Тетраэтилсвинец. М., Госхимиздат, 1946.
49. Крагельский И. В. Трение и износ. М., Машгиз, 1962.
50. Лосиков В. В. О топливе для газотурбинных энергетических установок. «Нефтяное хозяйство», № 9, 1955.
51. Лукьянин Н. Ф., Дроздов Н. Г. Пути предупреждения взрывов от статического электричества при наливе цистерн и резервуаров нефтепродуктами. «Нефтяное хозяйство», № 5, 1956.
52. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. М., изд-во «Мир», 1968.

53. Мартынов В. М., Кучинская Н. Д. Проникновение паров воды через тонкие слои консистентных смазок. «Химия и технология топлив и масел», № 7, 1958.
54. Мелик-Пашаев Н. И. Водородные ЖРД. «Авиация и космонавтика», № 9, 1965.
55. Мелькумов Т. М., Мелик-Пашаев Н. И. и др. Ракетные двигатели. М., изд-во «Машиностроение», 1968.
56. Михайлов Б. Первый всесоюзный реактивный. «Авиация и космонавтика», № 8, 9, 1969.
57. Михеев В. А., Семенов К. А., Черников Т. П. Комплексный метод испытания смазочных материалов на четырехшариковой машине трения. «Химия и технология топлив и масел», № 10, 1969.
58. Методы оценки эксплуатационных свойств реактивных топлив и смазочных материалов (сборник статей). Под ред. Залога Б. Д. М., изд-во «Машиностроение», 1966.
59. Моторные и реактивные масла и жидкости. Под ред. Папок К. К., Семенидо Е. Г. М., изд-во «Химия», 1964.
60. Моторные, реактивные и ракетные топлива. Под ред. Папок К. К., Семенидо Е. Г. М., Гостоптехиздат, 1962.
61. Нагиев М. Ф. Химия, технология и расчет процессов синтеза моторных топлив. М., Изд-во АН СССР, 1965.
62. Наметкин С. С. Химия нефти. М., ГОНТИ, 1939.
63. Некрасов Б. Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах. М., изд-во «Машиностроение», 1967.
64. Нефтепродукты, сборник стандартов. Методы испытаний. М., Изд-во стандартов, 1967.
65. Нефтепродукты, сборник стандартов. Масла, смазки, присадки. М., Изд-во стандартов, 1969.
66. Нефтепродукты (сборник стандартов). Топливо, битумы, парафины, растворители. М., Изд-во стандартов, 1970.
67. Новые о смазочных материалах, избранные доклады на международной конференции. Под ред. Виноградова Г. В. М., изд-во «Химия», 1967.
68. Новые направления криогенной техники (сборник). Под ред. Малкова М. П. М., изд-во «Мир», 1966.
69. Основы горения углеводородных топлив, сборник переводов. Под ред. Хитрина Л. Н., Попова В. А. М., Изд-во иностранной литературы, 1960.
70. Панов В. В., Папок К. К. Смазочные масла современной техники. М., изд-во «Наука», 1965.
71. Панов В. В., Соболев Ю. С. Масла для газотурбинных двигателей. М., Гостоптехиздат, 1958.
72. Папок К. К., Рагозин Н. А. Технический словарь-справочник по топливу и маслам. М., Гостоптехиздат, 1963.
73. Паушкин Я. М. Химия реактивных топлив. М., Изд-во АН СССР, 1962.
74. Петров П. А. Ядерные энергетические установки. М., Госэнергоиздат, 1958.
75. Проблемы окисления углеводородов. Под ред. Сергиенко С. Р. М., Изд-во АН СССР, 1954.
76. Пышнов В. С. О расходовании топлива в полете. «Вестник воздушного флота», № 10, 11, 1959; «Авиация и космонавтика», № 1, 1960.
77. Ривкин С. Л. Термодинамические свойства газов. М., изд-во «Энергия», 1964.
78. Рагозин Н. А., Воробьева А. Р. Огнеопасность реактивных топлив. «Химия и технология топлив и масел», № 4, 1958.
79. Рагозин Н. А. Реактивные топлива. М., Гостоптехиздат, 1959.
80. Резников М. Е. Особенности применения и контроля топлив для газотурбинных двигателей. «Гражданская авиация», № 1, 1957.
81. Резников М. Е. Авиационные и ракетные топлива и смазочные материалы. М., Воениздат, 1960.
82. Рожков И. В., Борисова Б. И., Чурушкин Е. С. Химические

- методы очистки топлив, применяемые за рубежом. «Химия и технология топлив и масел», № 7, 1969.
83. Рожков И. В., Корнилова Е. Н. О механизме действия антиокислителя при жидкофазном окислении этилированных бензинов. «Химия и технология топлив и масел», № 4, 1957.
84. Ройзен И. С. Техника безопасности и противопожарная техника в химической промышленности. М., Госхимиздат, 1951.
85. Русских П. Г. Как определить чистоту рабочей жидкости. «Авиация и космонавтика», № 10, 1968.
86. Сарнер С. Химия ракетных топлив. М., изд-во «Мир», 1969.
87. Семенидо Е. Г. Новое направление в производстве моторных масел. «Химия и технология топлив и масел», № 4, 1958.
88. Семенов Н. Н. Цепные реакции. М., ОНТИ, 1934.
89. Сергиенко С. Р. Очерк развития химии и переработки нефти. М., Изд-во АН СССР, 1955.
90. Серегин А. В. Жидкие ракетные топлива. Воениздат, 1962.
91. Силянтьев А. И. Твердые ракетные топлива. М., Воениздат, 1964.
92. Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. М., изд-во «Машиностроение», 1965.
93. Смолин А. К. Микробиологическая коррозия. «Авиация и космонавтика», № 2, 1969.
94. Соколик А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
95. Терещенко Е. Р., Тарарышкин М. Е. Исследование термической стабильности сернистых топлив. «Химия и технология топлива и масел», № 2, 1959.
96. Технические условия на нефтепродукты. М., изд-во «Недра», 1969.
97. Терминология топлива для двигателей внутреннего сгорания. Комитет технической терминологии АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1957.
98. Титов И. В. Вода в авиационных топливах. «Авиация и космонавтика», № 8, 1963.
99. Титов И. В. Двойная фильтрация топлив. «Авиация и космонавтика», № 7, 1963.
100. Феодосьев В. И., Синярев Г. Б. Введение в ракетную технику. М., Оборонгиз, 1960.
101. Физико-химические свойства индивидуальных углеводородов (справочник). Под ред. Татевского В. М. М., Гостоптехиздат, 1960.
102. Хавкин В. А., Хмельницкий Р. А. и др. Исследование основных превращений углеводородов в процессе гидрокрекинга. «Химия и технология топлив и масел», № 1, 1969.
103. Хемфрис Дж. Ракетные двигатели и управляемые снаряды. М., Изд-во иностранной литературы, 1958.
104. Чиolkовский К. Э. Труды по реактивной технике. М., Оборонгиз, 1948.
105. Чернова К. С., Шигина Р. К. и др. Исследование влагопоглощения и гидролитической устойчивости авиамасел для газотурбинных двигателей. «Химия и технология топлив и масел», № 10, 1969.
106. Черножуков Н. И., Крейн С. Э. Окисляемость минеральных масел. М., Гостоптехиздат, 1955.
107. Чертков Я. Б. Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива. М., изд-во «Химия», 1968.
108. Чертков Я. Б., Спиркин В. Г., Климов С. Г. Влияние сульфидов, содержащихся в топливе, на их эксплуатационные свойства. «Химия и технология топлив и масел», № 1, 1969.
109. Чертков Я. Б., Пискунов В. А. Полифункциональные присадки к реактивным топливам. «Химия и технология топлив и масел», № 5, 1969.
110. Чертков Я. Б., Спиркин В. Г., Игнатов В. М. Реактивные топлива США и Англии. «Химия и технология топлив и масел», № 4, 1967.
111. Шапиро Я. М., Мэзинг Г. Ю., Прудников Н. Е. Теория ракетного двигателя на твердом топливе. М., Воениздат, 1966.
112. Штода А. В., Алещенко С. П. и др. Конструкция авиационных газотурбинных двигателей. М., Воениздат, 1961.

113. Щетинков Е. С. Физика горения газов. М., изд-во «Наука», 1965.
114. Шелкин К. И. Гидродинамика горения. «Физика горения и взрыва», № 4, 1968.
115. Энглин Б. А. Применение моторных топлив при низких температурах. М., изд-во «Химия», 1968.
116. Энглин Б. А., Чертков Я. Б., Туголуков В. М. Разрушение кадмивых покрытий в топливах с повышенным содержанием меркаптанов и пути его предотвращения. «Химия и технология топлив и масел», № 9, 1958.
117. Armin Dadien. Theoretische Leistungen des triergolen Raketen-treibstoffsystems $F_2/LiH/H_2$. «Raumfahrtforschung», № 3, 1968.
118. Bathheider A. H. Supersonic Air Transport Engine Developments and Fuel Requirements — USA. «7th World Petroleum Congress», vol. 7, 1967.
119. Cooper R. S. Prospects For Advanced High-Thrust Nuclear Propulsion. «Astronautical and Aeronautical», № 1, 1966.
120. Davis J. D. Eden R. Q. E. Carburant pour Concorde. «Air-Space Technique», № 69, 1969.
121. Eggers R. F. Microthrust Monopropellant Hydrazine Propulsion-System Technology. «AIAA Paper», № 556, 1968.
122. Fletcher R. F. Liquid-Propellant Explosions. «Journal Spacecraft and Rocket», № 10, 1968.
123. Foster R. P., Sutprin E. M. Economical Mach 3+SST — Fuel Available Now. «SAE Preprints», № 650805, 1965.
124. Froning H. D. Some Preliminary Propulsion-System Considerations and Requirements of Interstellar Space Flight. «18th International Astronautical Congress. Propulsion and Re-Entry», vol. 3, 1968.
125. Keller C. W. «Slush» Extends Hydrogen Engines For Longduration Space Missions. «Space Aeronautical», № 5, 1968.
126. La Rocca A. V. Solid Propellant Electrical Thrustors. «AIAA Paper», № 619, 1965.
127. Liquefied Natural Gas Considered Promising as Mach 3 SST Fuel. «Aviation Week and Space Technology», № 21, 1966.
128. Lo R. E. Technical Feasibility Of Chemical Propulsion Systems With Very High Performance. «18th International Astronautical Congress. Propulsion and Re-Entry», vol. 3, 1968.
129. Military Studies Big Fuel Switchover. «Oil and Gas Journal», № 38, 1968.
130. Nixon A. C., Henderson H. T. Thermal Stability Of Endothermic Heat-Sink Fuels. «Industrial and Engineering Chemistry Production Research and Development», № 1, 1966.
131. Null F. E., Kyselka K. Production and Storage of Free Radical and Molecular Hydrogen. Патент США, класс 62—40, № 3242683, 1966.
132. Oil Hasn't Lost Turbine-Fuels Race Jet. «Oil and Gas Journal», № 13, 1969.
133. Piper J. E., Friedlander F. M. Space Storable Propulsion System Comparison. «AIAA Paper», № 614, 1968.
134. Sandri R., Billingham R. Ignition Of the Hydrogen-Oxygen Propellant Combination By Means Of Chlorine trifluoride. «AIAA Journal», № 4, 1967.
135. Sawyer R. F., McMullen E. T., Purgalis P. Hydrazine-Chlorine Pentafluoride Reaction In a Laboratory Rocket Combustor. «AIAA Journal», № 11, 1968.
136. Schiffmann R. Personal Rocket Flight. «Pulse», № 13, 1966.
137. Schwierigkeiten mit H_2-O_2 -Triebwerken. «VDI-Nachrichten», № 31, 1966.
138. Spengler G., Gemperlein H. Kraftstoffe für den Flugverkehr mit hoher Machzahl. «Jahrbuch Wissen. Gesellschaft Luft- und Raumfahrt», 1965.
139. Stengel R. F. Tripropellant Rocket Rivals Nuclear Rocket Performance. «Design News», № 8, 1967.
140. Tripropellant Rocket. «Spaceflight», № 4, 1967.
141. Vansant C. Hydrogen as an Aircraft Fuel. «New Scientist», № 586, 1968.
142. Yaffe M. L. Heat-Absorbing Fuel Study Pushed. «Aviation Week and Space Technology», № 26, 1968.

О ГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение	3
--------------------	---

Часть первая

ТОПЛИВА

Глава 1. Общая характеристика топлив для летательных аппаратов	6
Назначение и классификация топлив	—
Процессы воспламенения и горения топлива	10
Потребное количество окислителя	14
Теплота сгорания топлива	17
Топливо как источник рабочего тела	25
Топливо как источник импульса тяги	30
Основные показатели физических свойств жидких топлив	33
Основные показатели химических свойств жидких топлив	42
Общие требования к топливу	45
Глава 2. Краткие сведения о производстве топлив	48
Нефть — основной вид сырья для производства топлив	—
Прямая перегонка нефти	49
Очистка и переработка нефтепродуктов	50
Принципы производства неуглеводородных топлив и компонентов	52
Глава 3. Топлива для воздушно-реактивных двигателей (реактивные топлива)	54
Условия применения и требования к качеству топлив для газотурбинных двигателей	—
Сорта реактивных топлив	60
О влиянии свойств топлива на силу тяги двигателя	63
Влияние свойств топлива на дальность полета самолета и на потребное количество топлива для полета по заданной программе	64
Влияние свойств топлива на работоспособность и эксплуатационную надежность топливной системы самолета и двигателя	69
Влияние свойств топлива на надежность деталей газового тракта двигателя	79
Огнеопасность топлива	81
Перспективные топлива для воздушно-реактивных двигателей, рассчитанных на большие сверхзвуковые скорости полета	83
Глава 4. Авиационные бензины	86
Особенности поршневых двигателей и требования к топливу	—
Показатели детонационной стойкости	89
Антидетонатор	90
Сорта авиационных бензинов	91

Глава 5. Ракетные топлива (по материалам зарубежной печати)	93
Условия применения и общие требования к ракетному топливу	—
Жидкие ракетные топлива раздельной подачи	100
Окислительные компоненты жидких ракетных топлив	105
Горючие компоненты жидких ракетных топлив	107
Унитарные жидкие ракетные топлива	110
Особенности обращения с жидкими ракетными топливами	112
Особые свойства твердых ракетных топлив и требования к их качеству	116
Смесевые твердые ракетные топлива	119
Двухосновные (колоидные) твердые ракетные топлива	124
Перспективные высокоеффективные источники тяги	125

Ч а с т ь в т о р а я

СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

Глава 6. Общая характеристика смазочных материалов	132
Назначение и классификация смазочных материалов	—
Внешнее трение, граничная смазка и смазывающая способность	134
Вязкость (внутреннее трение) смазочных материалов	143
Вязкостно-температурные и пусковые характеристики смазочных материалов	146
Физическая стабильность и однородность смазочных материалов	151
Термоокислительная и термическая стабильность смазочных материалов	152
Коррозионная активность смазочных материалов	155
Общие требования к смазочным материалам	158
Глава 7. Краткие сведения о производстве смазочных материалов и технических жидкостей	161
Получение синтетических масел и жидкостей	—
Производство нефтяных масел	164
Получение присадок	166
Производство консистентных смазок	167
Производство этилового спирта	—
Глава 8. Масла для авиационных двигателей	169
Условия работы масла в турбореактивных двигателях и требования к маслам для них	—
Синтетические масла для турбореактивных двигателей	173
Нефтяные масла для турбореактивных двигателей	176
Перспективные смазочные материалы для ТРД с особо высокой температурой узлов трения	180
Особенности смазки турбовинтовых двигателей и применяемые на них масла	183
Масла для поршневых двигателей	186
Глава 9. Масла для механизмов и оборудования летательных аппаратов	190
Трансмиссионные масла	—
Масла для умеренно нагруженных механизмов, агрегатов и узлов	193
Приборные масла	194
Глава 10. Консистентные смазки	196
Состав и структура консистентных смазок	—
Структурно-механические свойства пластичных смазок	198

Стр.

Стабильность и защитные свойства консистентных смазок	202
Антифрикционные смазки	205
Уплотнительные смазки	209
Смазки для консервации	—
Глава 11. Технические жидкости	212
Назначение и классификация технических жидкостей	—
Жидкости для гидроустройств самолетов и вертолетов (гидромасла)	—
Авиационные антиобледенительные и охлаждающие жидкости	219
Огнегасящие составы	222
Литература	224

Резников Марк Евсеевич

**ТОПЛИВА И СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ**

Редактор Калашник Г. И.

Переплет художника Селезнева Е. И.

Технический редактор Медникова А. Н.

Корректор Сажина С. И.

Г-34311 Формат бумаги 60×90^{1/16} — 14^{1/2}, печ. л. = 14,5 усл. печ. л. 15,82 уч.-изд. л.

Бумага № 2. Тираж 8 000 экз. Изд. № 7/1829. Цена 1 р. 02 к. Зак. № 623

Ордена Трудового Красного Знамени

Военное издательство

Министерства обороны СССР. 103160. Москва, К-160

2-я типография Воениздата

Ленинград, Д-65. Дворцовая пл., 10

Резников М. Е. Доцент, кандидат технических наук.

P34 Топлива и смазочные материалы для летательных аппаратов. М. Воениздат, 1973 г.

232 стр.

В книге изложены основные сведения о свойствах и особенностях применения топлив, смазочных материалов и технических жидкостей, обеспечивающих работу двигателей, механизмов и обслуживающих систем летательных аппаратов. Рассматриваются как теоретические вопросы, дающие представление о смысле применения, преимуществах и недостатках различных видов топлив, смазочных материалов и технических жидкостей, так и практические вопросы обращения с ними при эксплуатации авиационной техники, при хранении и транспортировке.

Сорта современных авиационных топлив, масел, смазок и жидкостей описаны в соответствии с действующими стандартами. Характеристика ракетных топлив, а также специальных источников рабочих тел, смазочных материалов и технических жидкостей перспективных воздушных и космических летательных аппаратов основана на материалах, опубликованных в иностранной печати.

Книга рассчитана главным образом на инженерный и технический состав авиации. Возможно также ее использование в учебном процессе при подготовке специалистов авиационного профиля, в программу обучения которых входит курс топлив и смазочных материалов.