



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Б.А. Чичков,
А.В. Москаленко

**СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ.
ОСНОВЫ КОНСТРУКЦИИ
И ПРОЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ**

Топливные системы авиационных ГТД

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы

для студентов
специальности 25.03.01
всех форм обучения

Москва
2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

Кафедра двигателей летательных аппаратов

Б.А. Чичков, Л.В. Москаленко

**СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ.
ОСНОВЫ КОНСТРУКЦИИ
И ПРОЧНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ**

Топливные системы авиационных ГТД

**Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы**

*для студентов
специальности 25.03.01
всех форм обучения*

Москва
2019

ББК 0551-04

Ч-72

Рецензент:

Котовский В.Н. – д-р техн. наук, профессор

Чичков Б.А.

Ч-72 Системы двигателя. Основы конструкции и прочности двигателя. Топливные системы авиационных ГТД: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы. / Б.А. Чичков, Л.В. Москаленко. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 40 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочими программами учебных дисциплин «Системы двигателя». «Основы конструкции и прочности двигателя» по учебному плану для студентов специальности 25.03.01 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 11.06.2019 г. и методического совета 25.09.2019 г.

В авторской редакции.

Подписано в печать 07.10.2019 г.

Формат 60x84/16 Печ.л. 2,5 Усл. печ. л. 2,33

Заказ 517/3806 Тираж 80 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993 Москва, Кронштадтский бульвар, д.20

Отпечатано ООО «МИР»

394033, г. Воронеж, Ленинский пр-т 119А, лит. Я, оф. 215

Тел.: 8 (958) 649-53-31 Email: 89586495331@mail.ru

Введение

Топливная система авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) служит для подачи топлива из топливной системы воздушного судна (ВС) в камеру сгорания двигателя в достаточном количестве и в подготовленном для наиболее полного его сгорания виде. Топливные системы осуществляют также питание топливом, как рабочей жидкостью, служебных гидромеханизмов систем автоматического управления ГТД и, как охлаждающей жидкостью, топливомасляных радиаторов.

Цель работы – изучение вопросов построения (схемных решений), конструкции, работы и эксплуатации топливных систем авиационных ГТД.

Задачи работы:

1. изучить назначение, классификацию, условия работы, основные параметры (характеристики), требования к топливным системам авиационных ГТД и их агрегатам;

2. ознакомиться с основными видами конструктивно-схемных решений топливных систем ГТД: магистралями систем и их составом (агрегатами); схемами принципиальными гидравлическими систем со спецификациями. Выполнить принципиальную гидравлическую схему топливной системы со спецификацией;

3. изучить принципы анализа топливных систем и конструкции агрегатов с учетом условий их работы и воздействия эксплуатационных факторов, в т.ч.: выполнить оценку характеристик насосов, изучить особенности статического и динамического нагружения (агрегата, системы в целом) в условиях эксплуатации; охарактеризовать применяемые материалы для изготовления агрегатов и технологические особенности агрегатов; определить влияние особенностей конструкции и применяемых технологических решений на эксплуатационную надежность и технологичность, экологичность системы;

4. ознакомиться с методами анализа нарушения работоспособности топливных систем, поиска причин отказов и разработки мер по их устранению и предупреждению: основными типичными неисправностями системы, их проявлением, предупреждением, обнаружением, устранением; перечнем работ по техническому обслуживанию систем и мерами техники безопасности при выполнении работ;

5. приобрести навыки по самостоятельному изучению и анализу конструкций, работы топливных систем и особенностей их эксплуатации.

Вопросы свойств топлив и автоматического управления являются предметами отдельных дисциплин и здесь подробно не рассматриваются.

Вопросы, связанные с контрольно-измерительной аппаратурой рассматриваются в минимальном объеме, так как являются темой отдельного занятия по изучаемой дисциплине.

Занятия проводятся в помещениях специализированных классов кафедры ДЛА, оснащённых образцами газотурбинных двигателей, их узлов и агрегатов.

1. Общие сведения о топливных системах

Как указано выше, топливная система двигателя служит для подачи топлива из топливной системы воздушного судна в камеру сгорания двигателя в достаточном количестве и в подготовленном для наиболее полного его сгорания виде [2,3]. Топливные системы осуществляют также питание топливом, как рабочей жидкостью, служебных гидромеханизмов систем автоматического управления ГТД (силовых гидроприводов, клапанов перепуска воздуха –рис. 1) и, как охлаждающей жидкостью, топливомасляных радиаторов (ТМР).

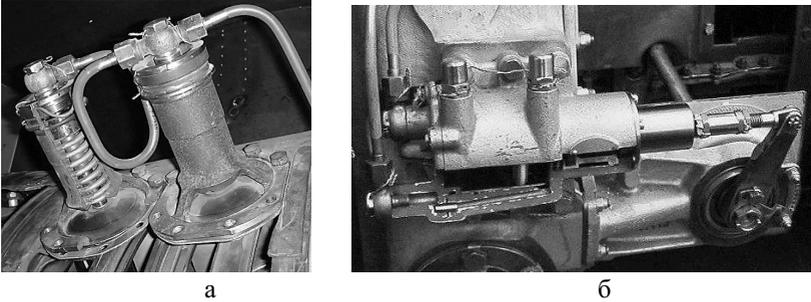


Рис. 1. Клапаны перепуска воздуха (а) и цилиндр направляющего аппарата (б) двигателя типа Д-30КП с подводом к ним топлива (цвет топливных трубопроводов - желтый)

Топливные системы должны:

- обеспечивать бесперебойную подачу и хорошее качество распыла топлива в камерах сгорания на всех режимах работы двигателя и при любых условиях полета;
- иметь высотность не меньше практического потолка самолета;
- быть безопасными в пожарном отношении;
- иметь высокую эксплуатационную технологичность (доступность, легкосъемность, контролепригодность, взаимозаменяемость, минимальное время и стоимость устранения неисправности в оперативном цикле эксплуатации);
- обеспечивать необходимую чистоту топлива;
- быть в максимально возможной степени автоматизированными и простыми в управлении;
- иметь малые габариты и вес.

Топлива для газотурбинных двигателей должны удовлетворять следующим основным требованиям: иметь большую теплоту сгорания при малом объеме; обладать высокой полнотой сгорания без эмиссии вредных веществ; не оказывать повреждающего действия на элементы системы топливопитания и конструкции двигателя; не изменять своего состава и свойств при длительном хранении; иметь низкую стоимость и т. п. Применение топлив, удовлетворяющих

этим требованиям, будет обеспечивать высокую экономичность воздушных перевозок, способствовать сохранению заданной надежности ГТД в эксплуатации и уменьшению их вредного влияния на окружающую среду. Следует отметить, что используемые в настоящее время авиационные топлива не в полной мере соответствуют указанным требованиям.

В современных ГТД применяют углеводородные топлива прямой перегонки нефти марок Т-1, ТС-1, Т-2, РТ, Т-5, Т-6, Т-7 и Т-8. Их получают на основе керосина с добавлением других фракций и различных присадок. Т-1 - это топливо типа керосина, ТС-1 - типа утяжеленного лигроина. Т-2 и РТ имеют широкий спектр составляющих, в том числе бензинолигроиновые фракции. Остальные топлива отличаются более тяжелым фракционным составом, повышенной плотностью и лучшей очисткой. Низшая теплота сгорания применяемых топлив составляет в среднем 43 МДж/кг, а плотность при температуре 293 град.К находится в пределах 750-850 кг/м³.

В качестве перспективного топлива для ГТД рассматривают жидкий водород. Водород имеет почти в 3 раза более высокую теплотворную способность по сравнению с керосином, запасы его практически неограниченные, и он является экологически чистым топливом, выделяя при сгорании обыкновенную воду. Следует отметить, что водород целесообразно использовать также как ингибитор, способствующий уменьшению эмиссии вредных веществ в продуктах сгорания керосина. Исследования показывают, что даже небольшие добавки водорода в зону горения керосина (до 5-7% по массе) обеспечивают снижение содержания канцерогенных веществ в продуктах сгорания примерно на порядок, а также уменьшают эмиссию окислов азота и углерода.

Использование жидкого водорода в качестве топлива сильно затрудняют его малая плотность и низкая температура кипения, требующие существенного увеличения объема баков и применения сложной криогенной техники. Другим перспективным криогенным топливом считают жидкий метан. При сгорании метана образуются безопасные в экологическом отношении углекислый газ и вода.

2. Типовые схемы топливных систем

Подвод топлива в двигатель из баков обеспечивают топливная система воздушного судна (рис.2) и топливная система двигателя (рис.3, 4) [3].

На схемах топливных систем двигателей условно показывают только один бак *Б* и подкачивающий насос *НП*.

Необходимый для полета запас топлива размещают в топливных баках, установленных внутри элементов конструкции воздушного судна (в крыле, фюзеляже) или на внешних подвесках, что наиболее характерно для вертолетов. На каждом баке устанавливают насос для перекачки топлива в один или два расходных бака, из которых подкачивающими насосами его подводят в топливные системы двигателей.

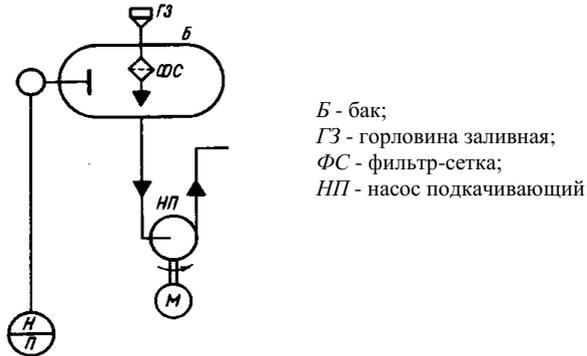


Рис. 2. Условное изображение части топливной системы воздушного судна (до входа в пожарный кран)

Топливную систему двигателя отключают от топливной системы воздушного судна перекрытым (пожарным) краном топлива *ПК*, имеющим привод от электромеханизма. Управление *ПК* осуществляют с помощью переключателя из кабины экипажа.

В зависимости от типа применяемого основного топливного насоса (*ОТН*) различают схемы топливных систем ГТД с *ОТН* управляемой производительности (рис. 3) и неуправляемой производительности (рис. 4).

В случае использования в конструкции двигателя трубчато-кольцевой камеры сгорания топливная система не содержит магистрали пускового топлива.

В общем случае в топливной системе современного ГТД с кольцевой камерой сгорания можно выделить три магистрали (низкого давления, высокого давления, магистраль пускового топлива) и систему дренажа топлива.

Магистраль низкого давления обеспечивает предварительное повышение давления топлива перед основным топливным насосом и служит для увеличения высотности топливной системы. В ее состав входят (рис. 1): подкачивающий двигательный насос *НПД* с регулятором давления, фильтр грубой очистки *Ф*, расходомер топлива и топливомасляный радиатор *ТМР*. Подкачивающий насос *НПД*, имеющий привод от ротора двигателя, повышает давление топлива до 0,15-0,3 МПа, в результате чего предотвращает его кавитацию на входе в основной топливный насос на больших высотах.

В качестве *НПД* наиболее часто применяют насосы центробежного типа с дросселирующими клапанами *КД*, автоматически поддерживающими заданное давление топлива за счет изменения гидравлического сопротивления выходной топливной магистрали.

ПК - перекрытой (пожарный) кран топлива;
 ННД - насос подкачивающий двигательный;
 КЛ - клапан дроселирующий, Ф1...4-фильтр;
 КН - клапан перекуской; ТМР - топливно-масляный радиатор; ОНН - основной топливный насос; ДК - дросельный кран; СК - стоп-кран;
 АДТ - автомат дозирования топлива; АРТ - автоматический распределитель топлива; Ф1х - первый контур форсунок; Ф2х - второй контур форсунок;
 КО - клапан обратный; ФП - форсунки пусковые; КДр - клапан дренажный; ЭМКх - электромагнитный клапан пускового топлива; БДр - бак дренажный; И - измеритель уровня топлива в баке; $\frac{P}{C}$ - сигнализатор давления топлива; $\frac{\Delta P}{C}$ - сигнализатор перепада давления на фильтре, суммирующий расходомер топлива; $\frac{P}{П}$ - измеритель давления топлива перед форсунками

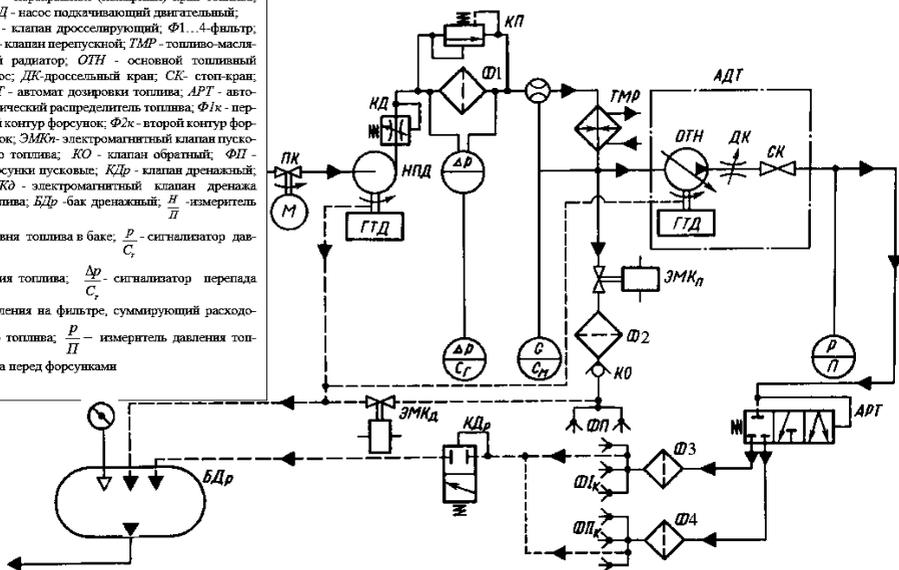


Рис.3. Схема топливной системы ГТД с ОНН управляемой производительности

Для вертолетных ГТД подкачивающие двигательные насосы обычно не применяют в связи с небольшими высотами полета вертолетов, не требующими существенного повышения давления топлива перед основными топливными насосами по условиям кавитации. Магистраль низкого давления для таких двигателей является продолжением топливной системы вертолета, но отделена от нее перекрывным (пожарным) краном топлива. Давление топлива в этой магистрали, создаваемое установленными на расходном баке электроприводными подкачивающими насосами, обычно не превышает 0,15 МПа.

Для очистки топлива в магистрали низкого давления устанавливают фильтр Φ с перепускным клапаном $КП$, пропускающим топливо по обводному каналу при засорении фильтрующих элементов и возрастании, вследствие этого, перепада давления на фильтре до 0,08-0,12 МПа. Контроль засоренности фильтра осуществляют с помощью сигнализатора перепада давления, включающего световое табло в кабине при увеличении перепада до 0,04-0,06 МПа. В некоторых ГТД за фильтром предусматривают сигнализацию минимального давления топлива, что позволяет контролировать в эксплуатации не только засоренность фильтра, но и неисправности подкачивающего насоса или его регулятора давления.

Контроль расхода топлива осуществляют с помощью расходомеров, датчики которых устанавливают обычно в магистрали низкого давления. В качестве датчиков расходомеров используют, например, расположенные в потоке крыльчатки, скорость вращения которых пропорциональна количеству протекающего топлива. Расходомерами измеряют суммарный и (или) мгновенный расход топлива в единицу времени (часовой расход). Топливомасляный радиатор $ТМР$ также располагают в магистрали низкого давления.

Магистраль высокого давления служит для подвода топлива к рабочим форсункам под давлением, обеспечивающим необходимое качество его распыливания в камере сгорания на всех режимах работы двигателя и при любых условиях полета. В этой магистрали размещены элементы системы автоматического управления (САУ) ГТД, производящие автоматическую дозировку топлива в необходимом количестве согласно заданным законам управления расходом топлива. Для создания необходимого давления топлива перед форсунками служит основной топливный насос $ОТН$, который на максимальном режиме должен повышать давление до величин 4-15 МПа. $ОТН$ имеет привод от ротора двигателя через коробку приводов агрегатов.

Как отмечено выше, в зависимости от типа применяемого $ОТН$ и соответствующего ему принципа управления расходом топлива, можно выделить две разновидности систем: с основным топливным насосом управляемой и неуправляемой производительности. В системах первого типа управление подачей топлива основано на изменении производительности $ОТН$ элементами автомата дозировки топлива $АДТ$ в соответствии с изменением условий полета и режимов работы ГТД, задаваемых положением рычага управления двигателем $РУД$, от которого зависит проходное сечение дроссельного крана $ДК$. В качестве $ОТН$

управляемой производительности применяют плунжерный насос с управляемой наклонной шайбой, на которую оказывают воздействие элементы *АДТ*, входящие в состав САУ ГТД. Для топливной систем, имеющих *ОТН* неуправляемой производительности, например, шестеренный насос высокого давления, управление расходом топлива может быть реализовано только на основе перепуска избыточного количества подаваемого насосом топлива с его выхода на вход. Этот перепуск должны осуществлять элементы *АДТ* в таком количестве, чтобы подача топлива в двигатель строго соответствовала заданному режиму его работы и условиям полета.

Простейшим устройством, позволяющим дозировать топливо по указанному принципу, является клапан перепада давления *КПД*, который автоматически поддерживает заданный перепад давления на дозирующей игле *ДИ* при любом ее проходном сечении, изменяемом с помощью *РУД*. Перемещение *РУД*, например, на снижение режима работы двигателя приведет к уменьшению проходного сечения *ДИ* и возрастанию перепада давления на ней, под действием которого *КПД* будет увеличивать перепуск топлива на вход в *ОТН* до тех пор, пока перепад не уменьшится на величину превышения. При этом подача топлива к форсункам будет снижена до уровня, соответствующего новому положению *РУД*.

В качестве *ОТН* неуправляемой производительности наиболее часто применяют шестеренные насосы, а также используют плунжерные насосы с неподвижной наклонной шайбой. Последнее особенно характерно для топливной систем вертолетных ГТД, в которых обусловленный отсутствием подкачивающих двигательных насосов некоторый недостаток давления топлива на входе в *ОТН* можно компенсировать повышенной устойчивостью плунжерных насосов к кавитации.

Насосы неуправляемой производительности выполняют с большим избытком подачи топлива по отношению к потребной, что необходимо для обеспечения потребной подачи при возможном снижении производительности насосов за счет износа их качающих узлов и уменьшения плотности топлива, дополнительно подогреваемого при перепуске (на больших высотах количество перепускаемого топлива достигает 80-90% от производительности насоса). В наибольшей степени снижение фактической производительности по указанным причинам свойственно шестеренным насосам, для которых запас производительности принимают не менее 1,5.

За автоматом дозировки топлива в магистрали высокого давления устанавливают стоп-кран *СК*, перекрывающий магистраль при выключении двигателя. Для предохранения от перегрузок качающего узла *ОТН* и элементов *АДТ* при резком повышении давления в момент закрытия *СК* на линии выхода из *ОТН* располагают предохранительный клапан *КПр*, который при достижении максимально допустимого давления открывает слив топлива на вход в насос. Во многих ГТД применяют стоп-краны специальной конструкции, позволяющей при перекрытии магистрали высокого давления сообщать ее со сливом.

Минимальное давление топлива, при котором центробежные форсунки могут обеспечивать удовлетворительное качество его распыливания в камере сгорания, составляет 0,3-0,4 МПа. Максимальное давление перед форсунками не должно превышать 12-15 МПа по условиям прочности трубопроводов и надежности основного топливного насоса. При таком диапазоне давлений расход топлива через одноконтурные форсунки можно изменить примерно в 5-6 раз, тогда как потребное отношение максимальной подачи топлива к минимальной достигает 15-25. Поэтому в ГТД часто применяют двухконтурные форсунки, которые позволяют увеличивать расход топлива не только путем повышения давления, но и за счет приращения площади проходного сечения последовательным включением в работу сначала первого, а затем второго контура. Иногда используют последовательно подключаемые две отдельные группы форсунок. В ГТД с относительно небольшими расходами топлива его подачу в камеры сгорания осуществляют одноконтурными форсунками.

Для включения в работу двухконтурных форсунок служит автоматический распределитель топлива *АРТ*, который в общем случае состоит из распределительного клапана и запорных клапанов обоих контуров. Отмеченные элементы *АРТ* на приведенных выше схемах условно объединены в один узел.

Запорный клапан первого контура открывает подвод топлива в соответствующие каналы форсунок *Ф1к* при давлении, обеспечивающем нормальный распыл топлива на запуске двигателя. На неработающем двигателе он предотвращает подтекание топлива в камеру сгорания. Распределительный клапан, устанавливаемый обычно на линии второго контура, обеспечивает доступ топливу в этот контур при увеличении давления до 1,5-2,5 МПа. Запорный клапан второго контура открывает подвод топлива в каналы форсунок *Ф2к*, при давлении более высоком (на 0,1-0,2 МПа), чем давление открытия распределительного клапана. Это способствует быстрому заполнению топливного коллектора и включению в работу распылителей второго контура форсунок.

Для предотвращения засорения форсунок механическими частицами подачу топлива к ним осуществляют через фильтры *Ф*.

Магистраль пускового топлива служит для питания топливом пусковых форсунок воспламенителей при запуске двигателя. Пусковые форсунки достаточно хорошо распыляют топливо, подведенное к ним под давлением 0,15-0,3 МПа. Поэтому питание данной магистрали осуществляют от подкачивающего двигательного насоса. При отсутствии *НПД*, а также, если он не имеет регулятора давления, топливо к пусковым форсункам подводят от основного топливного насоса через специальный клапан, обеспечивающий снижение давления до вышеуказанных величин и его стабилизацию.

Основными элементами магистрали пускового топлива являются: электромагнитный клапан *ЭМК* фильтр *Ф*, обратный клапан *ОК* и пусковые форсунки *ФП*. *ЭМК* служит для включения и выключения подачи топлива к форсун-

кам по автоматическим командам от панели запуска двигателя. *ОК* предотвращает прорыв горячего газа через форсунки из камеры сгорания в топливную магистраль после запуска ГТД.

В топливных системах ряда ГТД (обычно с трубчато-кольцевыми камерами сгорания) магистраль пускового топлива отсутствует. Для запуска таких двигателей используют свечи зажигания поверхностного разряда, воспламеняющие основное топливо, подаваемое в камеру сгорания рабочими форсунками.

Система дренажа топлива служит для уменьшения опасности возникновения пожара на двигателе и предусматривает слив небольшого количества топлива из мест его возможного скопления с последующим выбросом в атмосферу. Топливо сливают в дренажный бак *БДр* (см. рис.4) из топливных коллекторов, нижних полостей камеры сгорания и турбины, где оно может скапливаться после выключения или неудачного запуска двигателя.

Осуществляют также дренаж полостей между уплотнениями хвостовиков приводных валиков топливных насосов. Для слива топлива из коллекторов, полостей камеры сгорания и турбины применяют дренажные клапаны *КДр*, которые при работе двигателя закрыты усилиями от высокого давления топлива или газа и открываются усилием затяжки пружины при снижении давления до 0,2-0,4 МПа в момент останова ГТД. Из дренажного бака топливо вытесняется подведенным от компрессора воздухом в выходное устройство двигателя.

Иногда предусматривают дренаж отрезка магистрали пускового топлива (от форсунок до обратного клапана) через электромагнитный клапан *ЭМК*, который включают на короткое время после прекращения подачи топлива к форсункам воспламенителей. Через *ЭМК* топливо вытесняется из трубопроводов в дренажный бак повышенным давлением воздуха в камере сгорания.

3. Основные агрегаты и контрольно-измерительная аппаратура топливных систем

В состав топливной системы ГТД входят следующие основные агрегаты: насосы подкачки топлива, основной насос высокого давления, форсунки, радиатор(ы), агрегаты управления и регулирования подачи топлива, фильтры, трубопроводы, коллекторы и контрольно-измерительные приборы.

3.1. Типы топливных насосов, их сравнительная оценка и области применения, характеристики

Топливные насосы современных ГТД могут обладать максимальной производительностью в пределах 10000-20000 кг/ч при максимальном давлении на выходе (в зависимости от типа форсунок) до 4-15 МПа (40-150 кгс/см²).

В топливных системах могут применяться центробежные, плунжерные, шестеренчатые, и двойные насосы. Каждый из типов насосов имеет свои преимущества и недостатки, определяющие возможные области применения.

3.1.1. Центробежные топливные насосы

Центробежные насосы характеризуются возможностью получения весьма высокой производительности при малых габаритах и весе. Они менее других типов насосов чувствительны к качеству применяемого топлива.

В основном применяются в качестве подкачивающих, но могут использоваться и как основные.

В центробежном насосе (рис. 5) топливо по входному каналу 1 поступает к вращающейся крыльчатке 2.

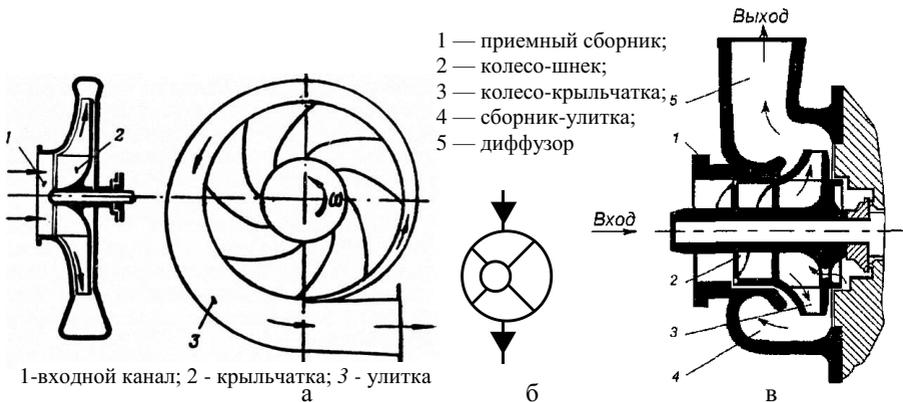


Рис. 5. Схема центробежного насоса (а), изображение его на принципиальной гидравлической схеме (б) и схема работы ДЦН-94 (ПС-90А [2])

Пройдя по каналам крыльчатки (рис. 5,а), топливо отбрасывается с повышенным давлением и скоростью в улитку 3. Крыльчатка насоса может иметь радиальные или загнутые против направления вращения лопадки. Наибольшее распространение получили крыльчатки с загнутыми лопатками. Применяющиеся крыльчатки могут быть открытые, полузакрытые и закрытые.

Крыльчатки нагружаются большими осевыми силами, возникающими под действием давления топлива. Для снижения давления позади крыльчаток в ступицах дисков высверливаются отверстия 5, через которые топливо перепускается на всасывание. Для уменьшения перетеканий на крыльчатке выполнены щелевые уплотнения 6 – рис. 6.

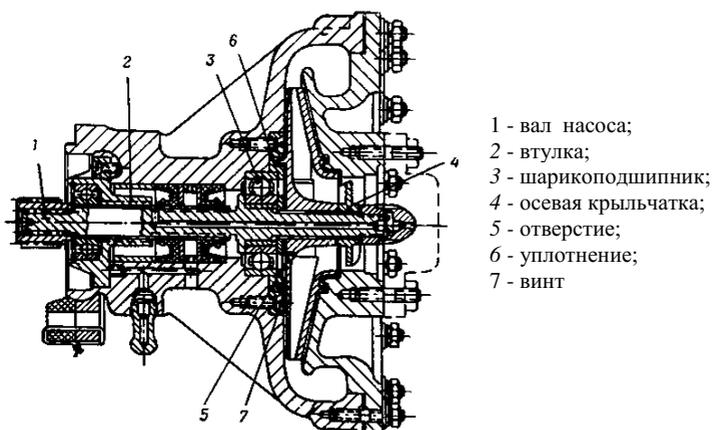


Рис.6. Центробежный насос с крыльчаткой закрытого типа

Валы крыльчаток обычно вращаются в подшипниках качения. Если насос приводится во вращение от ротора двигателя, то ближайший к приводу шарикоподшипник смазывается маслом, поступающим из корпуса привода двигателя. Шарикоподшипник 3 смазывается топливом, топливом охлаждается и вал 1 насоса. Топливо, прошедшее через подшипник 3, поступает в винтовые каналы под втулку 2, после чего по радиальным и осевому сверлениям, имеющимся в теле вала, отводится на сторону всасывания.

Центробежные насосы, как и насосы других типов, склонны к кавитации. Для снижения кавитации прибегают к увеличению давления перед входом в насос, а в некоторых случаях на входе в центробежный насос устанавливают осевую крыльчатку 4. Осевая крыльчатка имеет расчетную производительность, в 2-3 раза большую, чем центробежная крыльчатка – рис. 7.

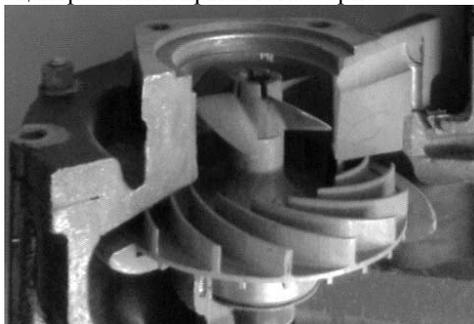


Рис. 7. Осевая и центробежная крыльчатка

Принципиальная схема подкачивающего топливного насоса ДЦН44-ПЗТ двигателя Д-30КП(КУ) [4] показана на рис. 8.

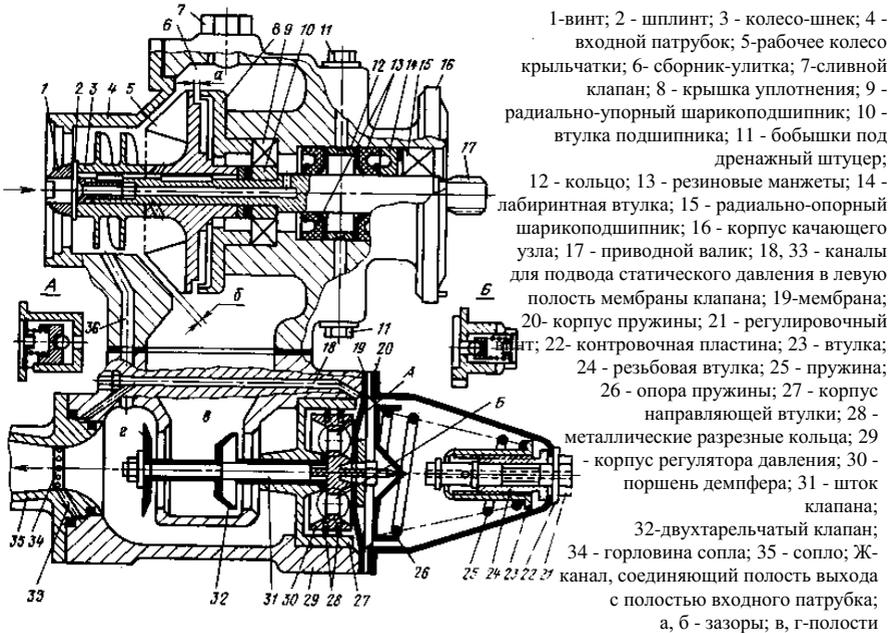


Рис. 8. Принципиальная схема подкачивающего топливного насоса ДЦН44-ПЗТ

3.1.2. Шестеренчатые топливные насосы

Шестеренчатые насосы (рис. 9) наиболее просты в конструктивном отношении, и, кроме того, они мало чувствительны к сорту применяемого топлива и содержанию в нем воды, к температуре топлива и окружающей среды. При том же весе и габаритах шестеренчатые насосы по своей производительности превосходят плунжерные в 1,5-2 раза. Шестеренчатые насосы также очень надежны в эксплуатации.

Наряду с указанными преимуществами, шестеренчатые насосы имеют и недостатки, связанные с трудностью обеспечения давления топлива на выходе и постоянной производительностью при неизменном числе оборотов. Для работы на режимах с пониженными расходами топлива шестеренчатые насосы снабжаются системами перепуска топлива. При перепуске топлива увеличивается затрата мощности на привод насоса и происходит нагрев насоса и циркулирующего в магистралях топлива.

Шестеренчатые насосы получили применение в качестве основных насосов в топливных системах с давлением до 50-60 кг/см².

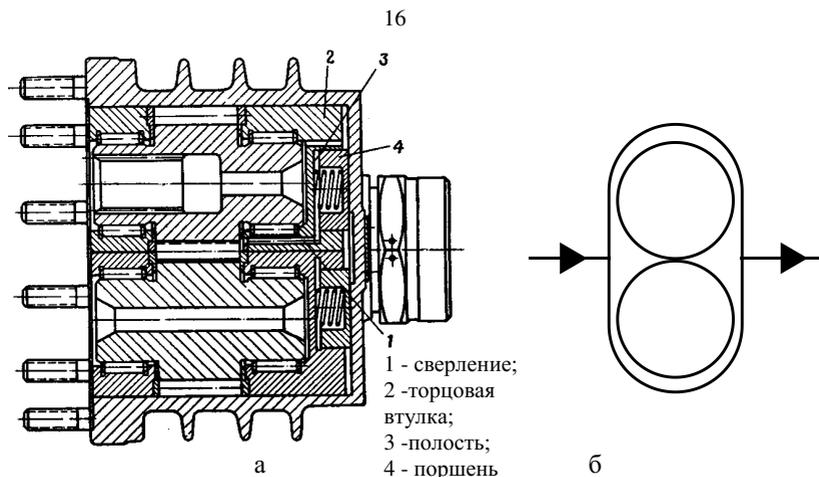


Рис.9. Шестеренчатый топливный насос с «плавающими» торцовыми втулками (а) и его изображение на принципиальной гидравлической схеме (б)

Основная особенность работы шестеренчатых топливных насосов по сравнению с аналогичными масляными насосами состоит в том, что они должны обеспечивать значительно большие подачи и давления топлива при малых пульсациях.

С целью уменьшения пульсаций потока шестерни шестеренчатых топливных насосов имеют большее число зубьев, чем у масляных насосов, несмотря на то, что увеличение числа зубьев вызывает увеличение габаритов насоса. В распространенных конструкциях топливных насосов шестерни имеют 7-17 зубьев.

При высоких давлениях топлива на выходе в шестеренчатых насосах наблюдаются значительные утечки через радиальные и особенно торцовые зазоры. Особенно сильно сказываются утечки при малой жесткости крышек насосов. Проникающее в зазор топливо прогибает крышки, что приводит к еще большему увеличению зазора. Поэтому для топливных насосов характерно применение массивных крышек, иногда сферических или даже оребренных.

Наиболее эффективным способом уменьшения утечек через торцовые зазоры является применение так называемых «плавающих» торцовых втулок 2 (см. рис.9). Втулки расположены между корпусом и шестернями. В полость 3 между поршнем 4 и втулкой подводится топливо из нагнетающей магистрали по сверлениям 1. Силой давления топлива поршни прижимаются к крышке, а втулки к торцам шестерен. Для уменьшения износа торцы втулок имеют бронзовые накладки.

Ввиду наличия высоких нагрузок у шестеренчатых топливных насосов для опор осей используются в большинстве случаев игольчатые подшипники. Подшипники скольжения применяются в насосах пусковых систем или в насосах

подкачки. Для смазки подшипников обычно используется топливо, поступающее к ним через торцовые зазоры.

Теоретическая объемная производительность насоса шестеренного типа за один оборот равна объему всех впадин между зубьями обеих шестерен.

Фактическая производительность шестеренчатого насоса

$$W = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot m \cdot n \cdot \eta \cdot 10^{-6}, \text{ л/мин} \quad (1)$$

где

(высота зуба принята удвоенному модулю зацепления)

n – частота вращения шестерен, об/мин;

η – коэффициент объемной подачи (0,75...0,85), учитывающий отличие фактической производительности насоса, от теоретически возможной из-за перетеканий по зазорам и в зоне зацепления зубьев, недостаточного заполнения впадин и т. д.;

d – диаметр делительной окружности шестерен, мм;

m – модуль зацепления, мм;

l – длина зуба (толщина шестерни), мм (составляет 0,5-2 от наружного диаметра шестерни).

Проверку правильности выбора параметров качающего узла насоса выполняют по условию, которое предусматривает запас производительности насоса на расчетном режиме в пределах 1,5-2, необходимый для обеспечения потребной подачи топлива к форсункам при наличии его управляемого перепуска из магистрали высокого давления на вход в ОТН, а также с учетом снижения плотности топлива из-за подогрева и возможного уменьшения производительности насоса за счет износа элементов качающего узла.

3.1.3. Двойные топливные насосы

Двойной насос (рис. 10) состоит из двух частей: подкачивающей центробежной и основной шестеренчатой.

Назначение подкачивающего насоса — повышать давление топлива, поступающего к нему на вход из расходного отсека самолетного бака, до значения, необходимого для бескавитационной работы шестеренчатой части насоса.

Шестеренчатая часть насоса предназначена для последующего, после центробежной части насоса, повышения давления топлива до значения, необходимого для преодоления сопротивления топливных магистралей, форсунок камеры сгорания к воспламенителям, а также для подачи топлива гидромеханическим устройствам системы регулирования.

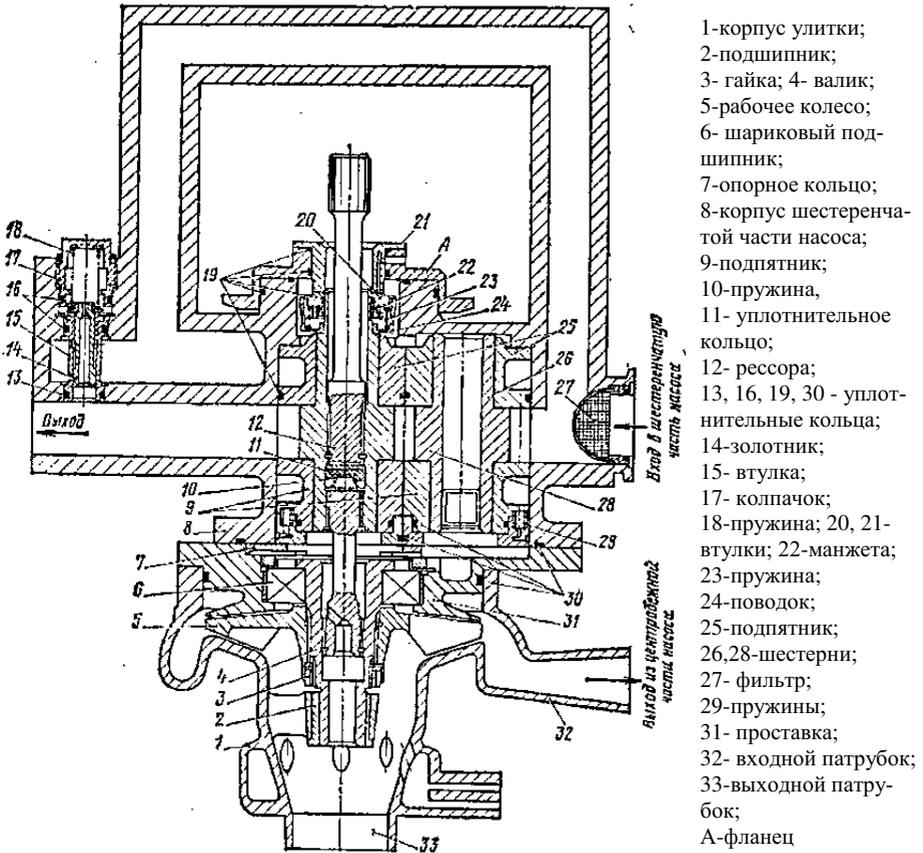


Рис. 10. Схема двойного насоса НД-86 [6]

Центробежная часть подкачивающего насоса состоит из следующих узлов: ротора, корпуса улитки 1, проставки 31. Ротор включает в себя рабочее колесо 5, валик 4, шариковый подшипник 6 и рессору 12. Валик с закрепленным на нем рабочим колесом получает вращение через рессору 12, ведущую шестерню 28, рессору 12 шестеренчатой части насоса от привода двигателя. Проставка 31, в которую установлен шариковый подшипник в, крепится к корпусу 8 насоса и к корпусу 1 улитки шпильками и зафиксирована двумя контрольными штифтами.

Шестеренчатая часть насоса состоит из корпуса 8, узла торцевого уплотнения, клапана предельного давления, пары цилиндрических шестерен - ведущей 28 и ведомой 26, двух неподвижных подпятников 9. Ведущая и ведомая шестерни расположены в двух смежных цилиндрических расточках корпуса. Расточки сообщены каналами: с одной стороны — с полостью входа, с другой с полостью выхода.

- 1-корпус улитки;
- 2-подшипник;
- 3- гайка; 4- валик;
- 5-рабочее колесо;
- 6- шариковый подшипник;
- 7-опорное кольцо;
- 8-корпус шестеренчатой части насоса;
- 9-подпятник;
- 10-пружина,
- 11- уплотнительное кольцо;
- 12- рессора;
- 13, 16, 19, 30 - уплотнительные кольца;
- 14-золотник;
- 15- втулка;
- 17- колпачок;
- 18-пружина; 20, 21- втулки; 22-манжета;
- 23-пружина;
- 24-поводок;
- 25-подпятник;
- 26,28-шестерни;
- 27- фильтр;
- 29-пружины;
- 31- проставка;
- 32- входной патрубков;
- 33-выходной патрубков;
- А-фланец

3.1.4. Плунжерные топливные насосы

Плунжерные насосы (рис. 11, 12) получили наибольшее распространение в качестве основных топливных насосов. Основными их преимуществами являются возможность получения высоких давлений топлива и возможность достаточно простого регулирования расхода топлива при постоянном числе оборотов.

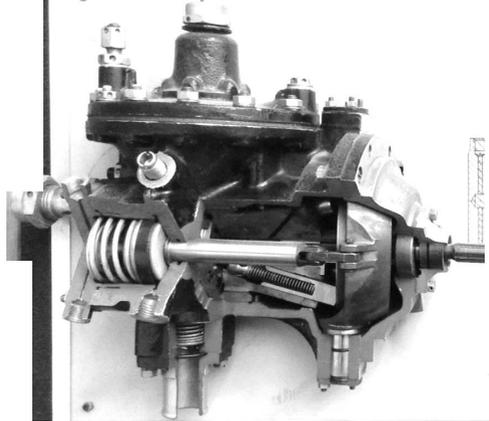


Рис.11. Плунжерный топливный насос

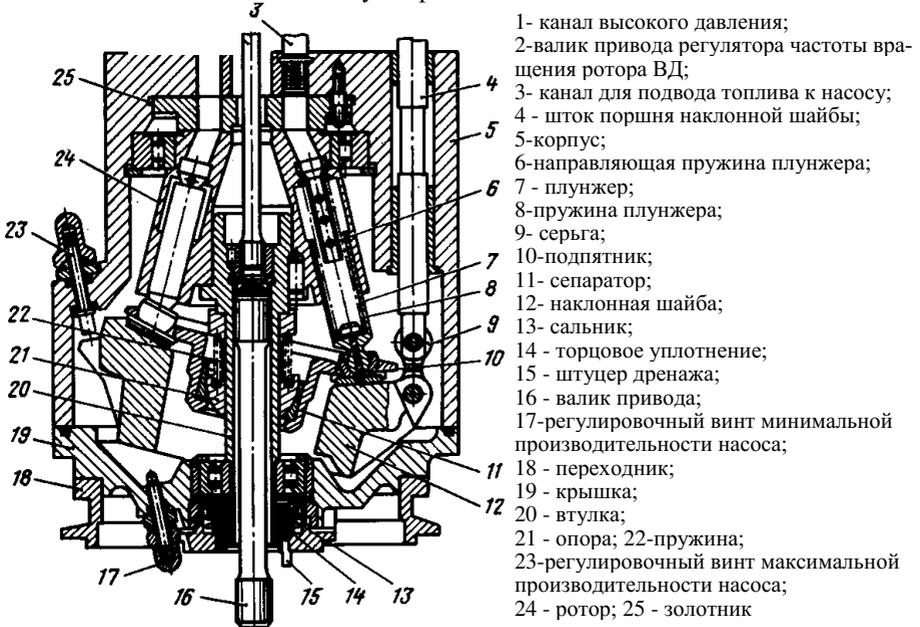


Рис.12. Плунжерный насос высокого давления двигателя Д-30КП [4]

В процессе изготовления плунжерные насосы сложнее, чем насосы других типов. Они весьма чувствительны к коррозии, попаданию механических примесей, кокса и смол, содержанию воды в топливе, а также высокой температуре окружающей среды. Все эти факторы вызывают увеличение сил трения между плунжерами и роторами, что может привести к задирам плунжеров и выходу насосов из строя.

Плунжерный насос обычно имеет ротор, в котором равномерно по окружности расположены наклонные к оси вращения отверстия для плунжеров. Торцы ротора прижат к распределительному золотнику, имеющему окна всасывания и нагнетания, сообщающиеся с соответствующими магистралями. Сферический конец плунжера упирается в наклонную шайбу. Наклонная шайба с помощью поршня может устанавливаться под различными углами к плоскости распределительного золотника, поворачиваясь вокруг осей.

При повороте ротора плунжер, скользя по наклонной шайбе, совершает поступательное движение, удаляясь от золотника. Отверстие в роторе сообщается со всасывающим окном золотника. Под плунжером при его движении создается разрежение и освобождающийся объем заполняется топливом из всасывающей магистрали.

Через половину оборота плунжер достигает верхней мертвой точки максимального удаления от золотника. При последующем повороте плунжер движется к нижней мертвой точке и вытесняет топливо через нагнетающее окно золотника.

За один оборот ротора насоса плунжер подает в нагнетающую магистраль объем топлива, заключенный между верхней и нижней мертвыми точками. Этот объем пропорционален ходу плунжера и его диаметру.

Плунжеры обычно имеют диаметр 12-15 мм. Ход плунжера зависит от угла наклона шайбы. Чем больше угол наклона шайбы к плоскости золотника, тем больше ход плунжера. В применяющихся конструкциях насосов ход плунжера составляет 15-35 мм.

Производительность насоса определяется величиной подачи одного плунжера, числом плунжеров и числом оборотов ротора насоса. Число плунжеров обычно нечетное: 5, 7, 9 или 11. Наиболее распространены семи- и девятиплунжерные насосы.

Располагаемую объемную производительность плунжерного насоса можно вычислить по следующей формуле:

$$W_n = i \frac{\pi d_{\text{пл}}^2}{4} h_{\text{max}} n \eta 10^{-6}, \text{ л/мин} \quad (2)$$

где

η -коэффициент объемной подачи (0,95-0,98);

n -частота вращения ротора (4000-5000 об/мин);

h_{max} -максимальный ход плунжера (15-40 мм);

$d_{\text{п}}$ - диаметр плунжера (12-15 мм);
 i - число плунжеров.

Для удовлетворения потребностей двигателя в топливе при возможном износе элементов качающего узла или в случае применения топлива с пониженной плотностью располагаемая производительность насоса должна быть на 5-10% больше потребной.

Нечетное число плунжеров выбирается из следующих соображений. Подача топлива плунжером пропорциональна скорости его поступательного движения и переменна по углу поворота ротора насоса - рис.13.

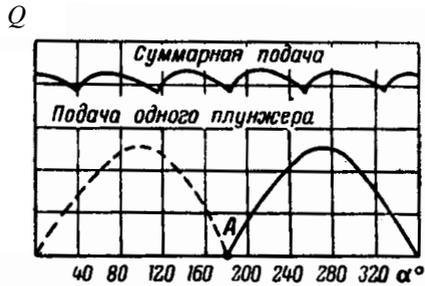


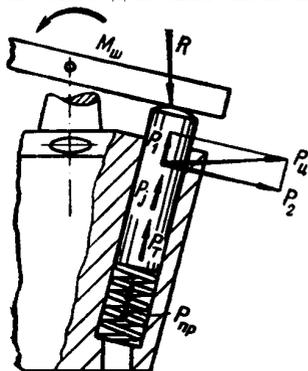
Рис.13. Зависимость подачи топлива Q от угла поворота шайбы α

Подача плунжера минимальная при нахождении его вблизи верхней и нижней мертвых точек. Производительность насоса складывается из подач отдельных плунжеров и, как это видно на рис. 13, также переменна по углу поворота ротора. Неравномерность подачи вызывает также пульсации давления топлива на выходе из насоса, что приводит к пульсационному сгоранию топлива в камерах. Пульсации подачи тем меньше, чем больше количество плунжеров у насоса. Однако при четном числе плунжеров пульсации подачи больше, чем при нечетном, даже (меньшем на единицу). Это объясняется тем, что при четном числе плунжеров два диаметрально противоположных плунжера будут одновременно иметь минимум подачи (точка А на рис. 13). При нечетном же числе плунжеров в момент нулевой подачи одного плунжера подача других плунжеров, находящихся над окном нагнетания, значительно отличается от нуля.

При работе плунжерного насоса вследствие разрежения на входе в насос возможно возникновение кавитации. Кавитацией называется выделение растворенного в топливе воздуха (или паров топлива) при падении давления топлива. Вследствие кавитации не весь объем, освобождаемый плунжером, заполняется топливом, часть объема заполняется воздухом и парами топлива, и производительность насоса падает. Особенно это сказывается при полете на больших высотах, когда вследствие падения атмосферного давления уменьшается давление

в топливных баках. Для предотвращения кавитации прибегают к установке подкачивающих насосов, которые поддерживают давление от 1,5 до 5-6 кгс/см² на входе в плунжерные насосы.

Плунжеры насосов представляют собой тонкостенные цилиндры. В центральной расточке плунжера помещается пружина с направляющей. На рис. 14 показана схема действия сил на плунжер.



- P_T - сила давления топлива;
- $P пр$ - сила пружины;
- P_I - сила инерции;
- $P_ц$ - центробежная сила;
- P_1 - составляющая центробежной силы вдоль оси плунжера;
- P_2 - составляющая центробежной силы, перпендикулярная оси плунжера;
- R - сила, действующая со стороны плунжера на наклонную шайбу;
- $M_{ш}$ - момент, действующий на шайбу

Рис. 14. Схема сил и моментов, действующих на плунжер и наклонную шайбу

Сила давления топлива за время одного оборота принимает последовательно два постоянных значения: при сообщении плунжера со всасывающей магистралью она направлена в сторону распределительного золотника, так как давление в корпусе насоса больше давления во всасывающей магистрали; при сообщении же с нагнетающей магистралью сила давления топлива возрастает в 30-60 раз (достигает рабочего давления) и направлена в сторону наклонной шайбы.

При поступательном неравномерном движении плунжера возникает сила инерции, которая примерно на половине хода всасывания и нагнетания стремится оторвать плунжер от наклонной шайбы, а в остальное время прижимает плунжер к ней. Так как при ходе всасывания возможен отрыв плунжера от наклонной шайбы, силу пружины выбирают такой, чтобы она превышала силу давления топлива и силу инерции при всасывании.

Вследствие вращения плунжера вместе с ротором возникает значительная центробежная сила. Эта сила может быть представлена в виде двух составляющих: одной - вдоль оси плунжера и другой - перпендикулярной к оси. Сила, действующая вдоль оси плунжера, способствует прижатию плунжера к наклонной шайбе и преодолению силы трения, возникающей в основном под действием второй составляющей центробежной силы. Сила трения зависит от чистоты обработки трущихся поверхностей и их материала. Для уменьшения трения плунжеры притираются к поверхностям отверстий.

Роторы плунжерных насосов изготавливаются из бронзы или стали. При использовании бронзы улучшается теплоотвод от ротора в топливо, а также умень-

шается сила трения между плунжером и ротором. Стальные роторы применяются в тех случаях, когда этого требуют условия прочности. При использовании стальных роторов в целях уменьшения трения в них запрессовывают бронзовые втулки - направляющие плунжеров. В направляющих или в отверстиях под плунжеры делают несколько кольцевых канавок. Канавки предназначены для отложения твердых частиц, проникающих в зазор между ротором и плунжером, а также для выравнивания давления топлива по окружности плунжера. В зазоре между ротором и плунжером имеется топливо, и если его давление не выравнено по окружности, то плунжер расположится в отверстии эксцентрично, прижмется к одной стороне и будет работать без смазки, что увеличит силы трения.

Распределительный золотник изготавливается из стали или бронзы, причем для уменьшения трения между ротором и золотником их материалы должны быть различными. Торец распределительного золотника, обращенный к ротору, служит в качестве упорного подшипника ротора. Радиальными опорами ротора являются роликовый подшипник и медно-графитовый подшипник скольжения. В некоторых конструкциях вместо медно-графитового подшипника применяется роликовый подшипник.

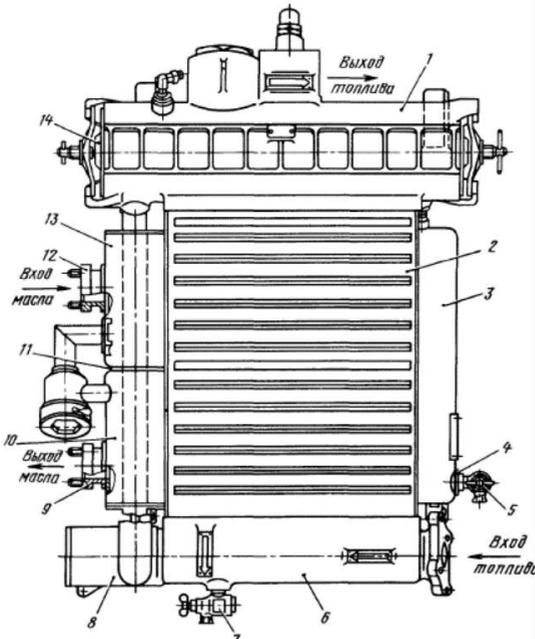
Наклонная шайба представляет собой как бы кольцо комбинированного упорно-опорного подшипника. Таким образом, при работе насоса силами трения плунжеров наклонная шайба также увлекается во вращение. Ввиду того, что точки касания плунжеров и наклонной шайбы находятся на разных расстояниях от оси вращения ротора, а следовательно, движутся с различными окружными скоростями, а также из-за переменной (по углу поворота ротора) силы трения плунжера о шайбу, наклонная шайба вращается неравномерно и происходит проскальзывание ее относительно плунжеров. Благодаря этому, в процессе работы насосов точки контакта плунжеров и шайбы непостоянны, что способствует равномерному износу поверхности шайбы.

3.2. Топливо-масляные радиаторы

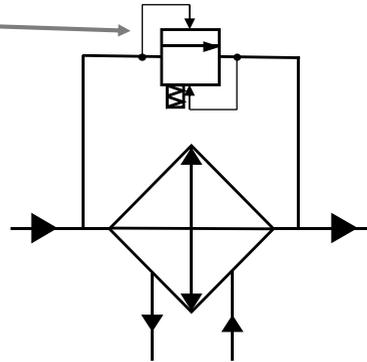
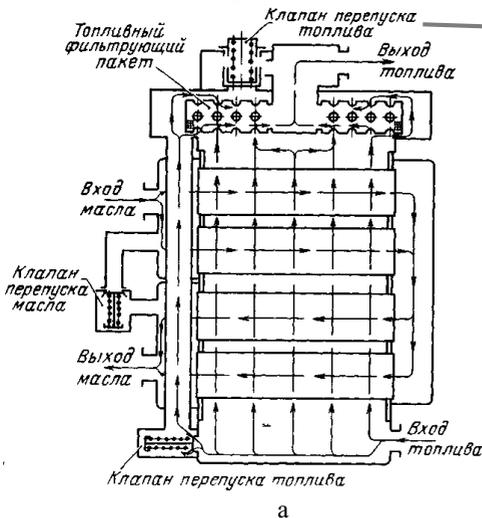
Топливо-масляные радиаторы (*ТМР*) (рис. 15) применяется для охлаждения масла и подогрева топлива, что предотвращает образование кристаллов льда на топливных фильтрах низкого давления.

Для существующих конструкций *ТМР* отношение охлаждающей поверхности к площади поперечного сечения составляет 90-100. Сухая масса радиатора достигает 3,5-4 кг на 1 м² охлаждающей поверхности [2].

Пример конструктивных элементов, схема циркуляции топлива и масла в радиаторе, обозначение *ТМР* на принципиальной гидравлической схеме представлены на рис. 15.



- 1 - корпус топливных фильтров,
 2 - корпус радиатора;
 3, 10, 13 - крышки масляной
 полости;
 4 - бобышка;
 5 - кран для слива масла; 6-крышка
 топливной полости;
 7 - кран для слива топлива;
 8, 20- клапаны перепуска топлива;
 9- фланец для отвода масла из
 радиатора; 11 - перегородка; 12 -
 фланец подвода масла в радиатор,
 14- фильтрующий пакет; 15- фланец
 для отвода топлива; 16 - клапан для
 стравливания воздуха; 17, 24 -
 кронштейны крепления радиатора;
 18 - фланец для подвода топлива;
 19, 21 -штуцера для замера давления
 топлива;
 22 -труба для перепуска топлива;
 23 - клапан перепуска масла;
 25 -штуцер для слива топлива в
 радиатор из регулятора привода
 постоянной частоты вращения;
 а-топливная полость радиатора;
 б-масляная полость радиатора



а

б

Рис. 15. Конструктивные элементы, схема циркуляции топлива и масла в радиаторе (а), обозначение ТМР на принципиальной гидравлической схеме (б)

Топливомасляный радиатор, как правило, состоит из корпуса, обычно сварной конструкции, внутри которого закреплены трубки-соты диаметром 4-5 мм, толщиной 0,2-0,4 мм и длиной 250-300 мм. Трубки выполняют из материалов с высокой теплопроводностью — меди, латуни или алюминиевых сплавов. Топливо протекает внутри, а горячее масло циркулирует между трубками-сотами, передавая им тепло, и охлажденным отводится из радиатора. Скорость течения масла обычно не превышает 0,2-0,3 м/с.

При повышении гидравлического сопротивления TMP в случае сильного его загрязнения или прокачки холодного масла специальный клапан перепускает масло с линии входа в радиатор к выходному штуцеру, предотвращая разрушение сот увеличенным давлением.

3.3. Топливные фильтры и подогреватели

Для очистки топлива от механических загрязнений применяют фильтры. Фильтр (рис. 16) — это агрегат, в котором обеспечивается удаление из жидкости механических загрязнений посредством ее пропускания через пористые или ячеистые материалы [2]. Чистота топлива во многом определяет надежность работы качающих узлов насосов и элементов топливо-регулирующей аппаратуры. Одним из основных параметров фильтра является тонкость фильтрации. Различают абсолютную и номинальную тонкость фильтрации. Абсолютная тонкость фильтрации соответствует максимальному размеру частиц, пропускаемых фильтром. Номинальная тонкость фильтрации соответствует размеру частиц, не менее 97% которых задерживаются фильтром.

В топливной системе двигателя устанавливается основной топливный фильтр ($OT\Phi$) и ряд вспомогательных фильтров. $OT\Phi$ устанавливается перед насосом высокого давления и обеспечивает фильтрацию всего топлива, поступающего в двигатель. Вспомогательные фильтры устанавливаются на входе в отдельные агрегаты, а также в сливных магистралях, соединяющих агрегаты с основной магистралью топливной системы двигателя, помимо $OT\Phi$.

$OT\Phi$ должен удовлетворять следующим требованиям:

обеспечивать необходимую степень фильтрации топлива в течение установленного межпромывочного ресурса; иметь достаточную пропускную способность (т.е. перепад давления на чистом фильтре при максимальном расходе топлива не должен превышать заданной величины); в конструкции фильтра должен быть предусмотрен перепускной клапан, открывающийся при нерасчетном засорении фильтроэлемента и обеспечивающий подачу топлива с необходимым расходом; фильтр должен быть оборудован сигнализатором перепада давления, позволяющим определить предельное засорение фильтроэлемента; на фильтре должны быть установлены устройства (клапаны) для слива топлива из полости фильтроэлемента перед его снятием и для стравливания воздуха после его установки; фильтр должен располагаться в легкодоступном месте на двигателе. Не

допускается демонтаж каких-либо агрегатов, датчиков, трубопроводов и электропроводки при смене фильтроэлемента; фильтроэлемент должен быть легко-съемным. При снятии фильтроэлемента должна исключаться возможность попадания загрязнений в топливную систему;

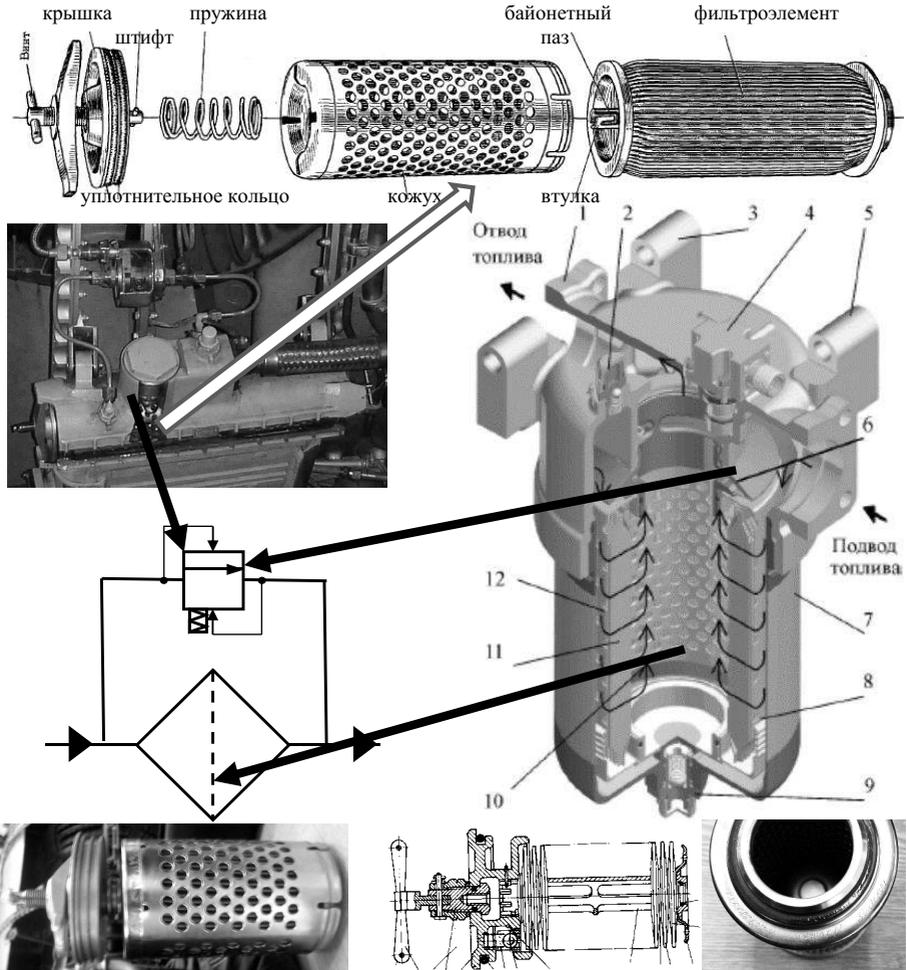


Рис. 16. Основной топливный фильтр ТРДД типа Д-30КП [4] и основной топливный фильтр унифицированной конструкции [2] (ОТФУК)
 На схеме ОТФУК: 1-корпус; 2-клапан стравливания воздуха; 3,5,13-ушки для крепления фильтра; 4-электрический сигнализатор перепада давления; 6-перепускной клапан; 7-стакан; 8-фильтроэлемент; 9-сливной клапан; 10-каркас; 11-фильтрующая сетка; 12-защитный кожух

расположение перепускного клапана должно сводить к минимуму возможность попадания за фильтр скопившихся загрязнений в случае его открытия; фильтро-элемент и фильтр должны обладать достаточной прочностью и герметичностью; назначенный ресурс и срок службы должны быть не меньше, чем для двигателя в целом; масса и размеры фильтра должны быть минимальными.

В топливной системе могут применяться подогреватели топлива – рис. 17.

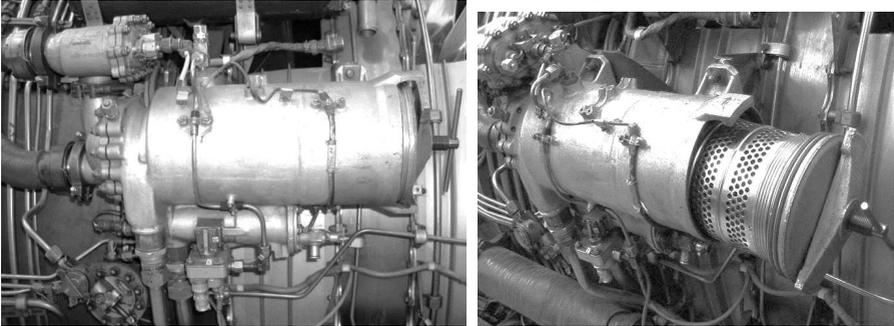


Рис. 17. Подогреватель топлива двигателя типа НК-86

Подогреватель предназначен для дополнительного подогрева топлива, поступающего в топливный фильтр тонкой очистки, для исключения возможности обледенения топливного фильтра и подачи неочищенного топлива в насос. Подогреватель выполнен в виде блока, объединяющего топливный фильтр и теплообменник. Внутри корпуса подогревателя расположен топливоздушный теплообменник, а между корпусом и теплообменником находится фильтрующий пакет тонкой очистки. На входе воздушного потока в подогревателе устанавливается пневматическая заслонка, управляемая электромагнитным клапаном.

3.4.Топливные форсунки

Ввод топлива в камеры может осуществляться в паровой или жидкой фазе, для чего соответственно применяются испарительные или распыливающие форсунки.

Испарительные форсунки (рис.18) просты по своей конструкции и технологии, так как для их изготовления не требуется высокий класс точности.

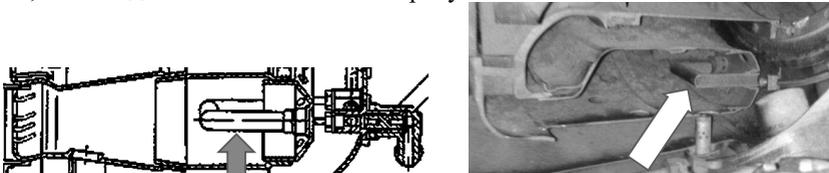


Рис.18. Испарительные топливные форсунки (указаны стрелками) в конструкции ВСУ [5]

Из форсунки топливо поступает под невысоким давлением в испарительные трубки Г-образной формы, расположенные в камере сгорания. Проходя в трубках, топливо нагревается, испаряется и смешивается с воздухом. Образуется богатая топливо-воздушная смесь с коэффициентом избытка воздуха 0,25-0,30, которая поступает в камеру сгорания. Применяются, в основном, в конструкции ВСУ.

Распыливающие форсунки подают в камеру струю топлива, которая затем распадается на мелкие капли. Для получения высокой полноты сгорания, устойчивого горения и надежного запуска распыливающие форсунки должны обеспечивать оптимальное сочетание мелкости распыливания топлива и формы струи, которая в основном определяется углом ее раскрутки, называемым углом факела. Распыливание увеличивает поверхность соприкосновения топлива с воздухом облегчает воспламенение смеси и её полное сгорание. Чрезмерно тонкое распыливание понижает устойчивость горения на бедных смесях, так как при быстром испарении мелких капель образуется однородная топливо-воздушная смесь, имеющая более узкие пределы воспламенения, чем неоднородная смесь. При глубоком распыливании ухудшается также полнота сгорания. Наиболее благоприятным является получение на всех режимах работы двигателя углов распыла: на режиме запуска двигателя при воспламенении — 60-70°, в конце запуска и на режиме малого газа — 100-120° и на номинальных режимах — 80-90°.

Форсунки, работающие от одного коллектора, должны обеспечивать одинаковый расход топлива на всех режимах работы. Расход топлива должен оставаться также стабильным и при изменении температуры и вязкости топлива.

Распыливающие форсунки могут быть струйными и центробежными.

Струйная форсунка (рис. 13) имеет цилиндрическое сопло; топливо, выходящее из него, имеет малый угол факела. Струйные форсунки не получили широкого применения, так как не обеспечивают хорошего распыла топлива и распределения его по объему камеры при приемлемых давлениях топлива перед форсункой.

Центробежные форсунки, которые могут быть как регулируемые, так и нерегулируемые, получили наибольшее распространение.

Нерегулируемые центробежные форсунки применяются в пусковых и форсажных системах топливо питания.

Регулируемые центробежные форсунки применяются в камерах двигателей, имеющих широкий диапазон потребных расходов топлива.

3.4.1. Нерегулируемые центробежные форсунки

Распыл топлива центробежными силами закрученного потока является наиболее совершенным. Поэтому центробежные форсунки получили наиболее широкое распространение. Принцип работы центробежной форсунки показан на

рис. 19. Закрутка потока может осуществляться с помощью шнекового завихрителя или подачи топлива в камеру закручивания через тангенциальные входные отверстия.

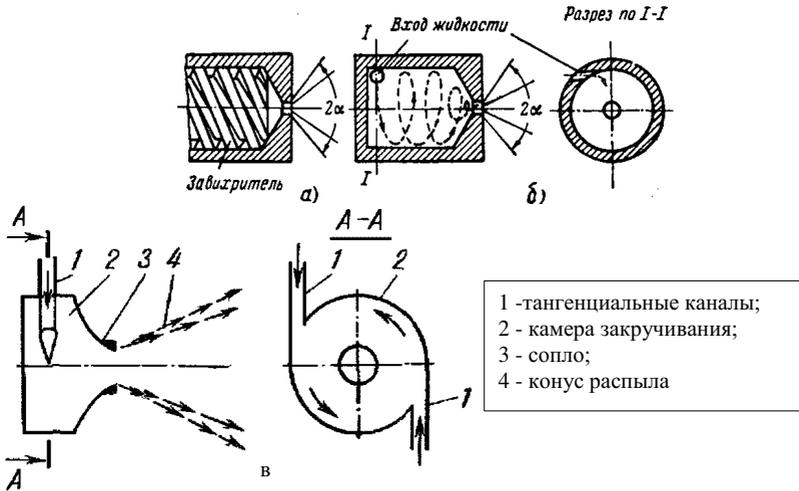
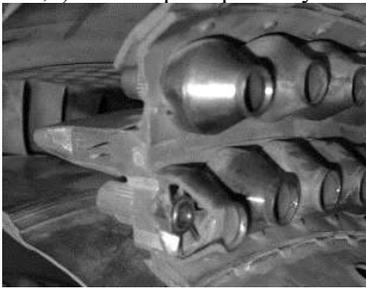
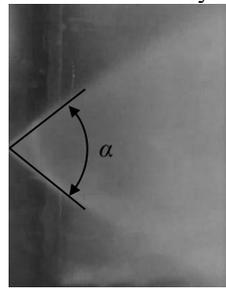


Рис.19. Принципиальные схемы центробежной форсунки с завихрителем (а) и тангенциальной (б,в)

Выйдя из сопла, частицы топлива движутся по линейным траекториям, образующим полый конус. Центральная часть сопла и камеры закручивания заполнены воздушным вихрем. Граница воздушного вихря находится на том радиусе камеры закручивания, где давление топлива падает до значения, равного давлению воздуха в камере сгорания. Конус выходящего из форсунки (рис. 20,а) топлива (рис. 20,б) имеет при вершине угол α , который и называется углом факела.



а



б

Рис. 20. Нерегулируемые центробежные форсунки (а) и конус распыла (б)

Производительность форсунки зависит от ее геометрических размеров, в

частности, от диаметра сопла, радиуса камеры закручивания и суммарной площади входных тангенциальных каналов, а также от давления топлива перед форсункой.

Расход через форсунку увеличивается с возрастанием давления и увеличением площади сопла и входных каналов. Увеличение радиуса камеры закручивания приводит к уменьшению расхода топлива. Качество распыла топлива зависит от разности давления топлива на входе в форсунку и давления воздуха в камере сгорания. Опыты показывают, что при перепаде давлений, меньшем чем $3-4 \text{ кг/см}^2$, топливо вытекает из форсунки в виде пузыря, плохо распадающегося на капли. Вследствие этого возникает необходимость ограничения минимального давления топлива перед форсунками.

При работе двигателя в различных условиях количество топлива, которое необходимо подать в камеры сгорания, изменяется. В нерегулируемой форсунке изменение расхода топлива производится путем изменения давления топлива перед форсункой. Практически за счет изменения давления от минимального до максимально возможного в нерегулируемых форсунках можно добиться изменения расхода в 4-5 раз.

Характеристика нерегулируемой центробежной форсунки, представляющая собой зависимость расхода топлива от давления перед форсункой, показана как характеристика первого контура на рис. 22.

3.4.2. Регулируемые центробежные форсунки

Потребный расход через форсунку авиационного газотурбинного двигателя меняется в зависимости от режима полёта в 20-30 раз. Максимальное давление ограничено из условия получения удовлетворительного распыла. Возникает нужда в регулируемых форсунках – рис. 21.

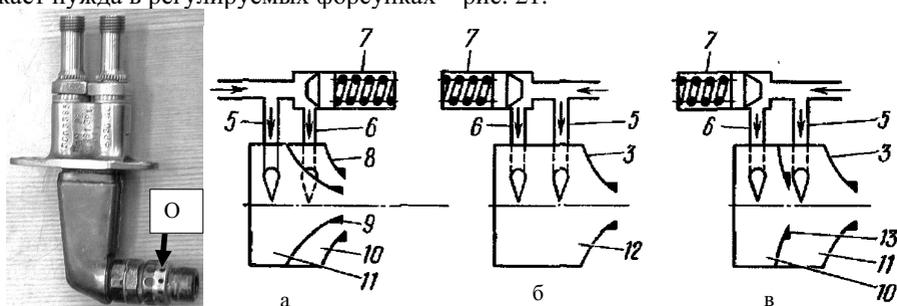


Рис. 21. Схемы центробежных двухконтурных топливных форсунок

а - двухсопловая, б - однокамерная, в - двухкамерная;

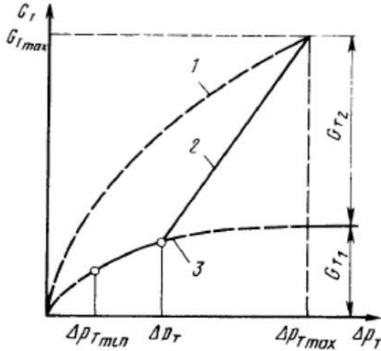
5 - каналы 1 контура; 6 - каналы 2 контура; 7 - распределительный клапан; 3 - сопло 2 контура;

9 - сопло 1 контура; 10 - камера закручивания 2 контура; 11 - камера закручивания 1 контура;

12 - общая камера закручивания; 13 - диафрагма; О - отверстия для прохода охлаждающего

воздуха

Характеристика расхода топлива в двухсопловой форсунке представлена на рис. 22.



- 1 - расход топлива через I и II контуры при полном открытии распределительного клапана;
- 2 - расход топлива через I и II контуры при частично открытом распределительном клапане;
- 3 - расход топлива через I контур

Рис. 22. Характеристика расхода топлива в двухсопловой форсунке

Питание форсунок выполняется топливным коллектором – рис. 23.

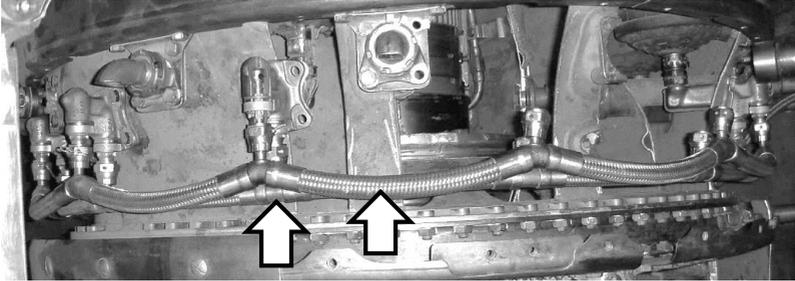


Рис. 23. Пример топливных коллекторов (указаны стрелками)

В состав воспламенителей входят пусковые форсунки – рис. 24 [6].

На рис. 24: а-общий вид; б-продольный разрез; 1-наружная втулка; 2-отверстие; 3-нагревательный элемент; 4, 19- болты; 5- корпус воспламенителя; 6-свеча; 7, 8-резьбовые штуцеры; 9-отверстие для контровки; 10-фильтр; 11, 13, 18, 21-уплотнительные кольца; 12-корпус пусковой форсунки; 14-гайка; 15- винт; 16-пусковая форсунка; 17- внутренняя втулка; 20-замок пластинчатый; 22-окна; 23-камера сгорания воспламенителя; 24-тангенциальное отверстие; 25-камера закручивания; 26-центральное сопло; 27-отверстие

Агрегаты управления и регулирования подачи топлива состоят из перекрывных и запорных (пожарных) кранов, входящих в систему топливопитания самолета, автоматических регуляторов подачи топлива, дроссельных кранов и стоп-кранов, предназначенных для останова двигателя.

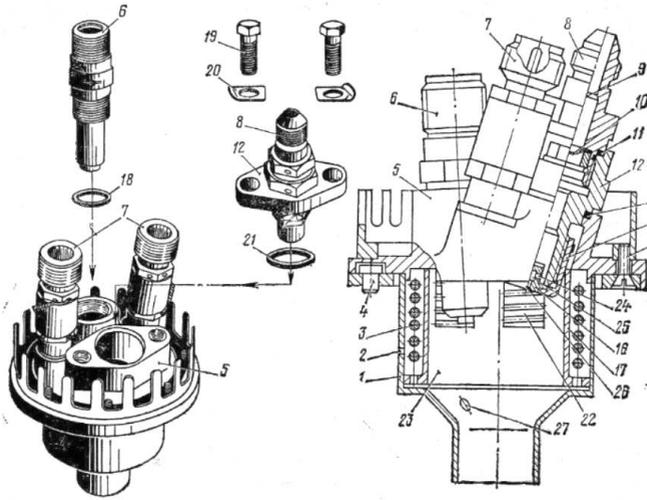


Рис. 24. Воспламенитель

3.5. Автоматический распределитель топлива

Как было отмечено выше, для включения в работу двухконтурных форсунок служит автоматический распределитель топлива *АРТ*, который в общем случае состоит из распределительного клапана и запорных клапанов обоих контуров - рис. 25.

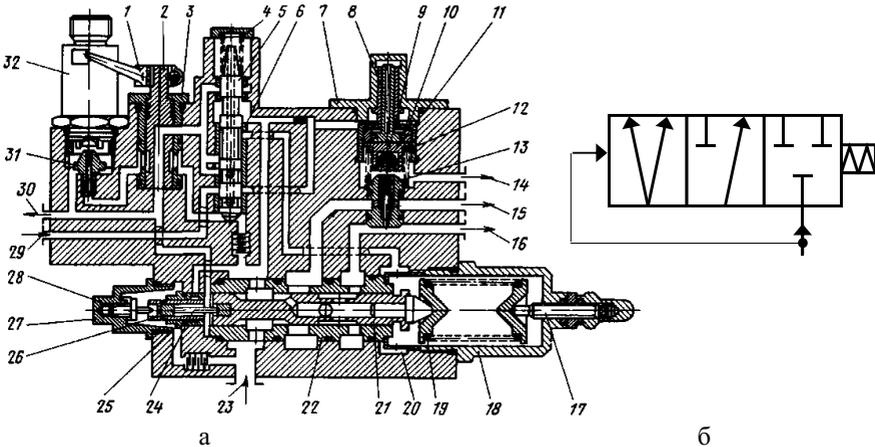


Рис. 25. Распределительный клапан, механизм останова и клапан слива насоса-регулятора НР-30КП (а) и его изображение на схеме (б)

На рис. 25: 1 - рычаг останова двигателя; 2- золотник останова; 3, 6, 10, 22, 25- гильзы; 4, 12, 19 - пружины, 5-исполнительный золотник механизма останова; 7, 18 - крышки; 8-штулка клапана слива; 9-поршень; 11 - клапан слива, 13 - седло клапана; 14 -канал отвода топлива в дренажный бачок; 15 - канал отвода топлива во второй контур форсунок; 16-канал отвода топлива в первый контур форсунок; 17 - регулировочный винт РК; 20 - стакан; 21- золотник распределительного клапана; 23- канал подвода топлива от дозирующей иглы автомата приемистости; 24 - опорная игла; 26 - золотник; 27 - колпачок; 28- упор; 29- канал подвода топлива от клапана поддержания перепада давлений на дозирующей игле автомата приемистости; 30-канал слива топлива; 31 - седло клапана; 32 - электромагнит

3.6. Основная контрольно-измерительная аппаратура, используемая в топливных системах

К контрольно-измерительной аппаратуре относят датчики (рис. 26, 27) и элементы индикации в кабине воздушного судна.

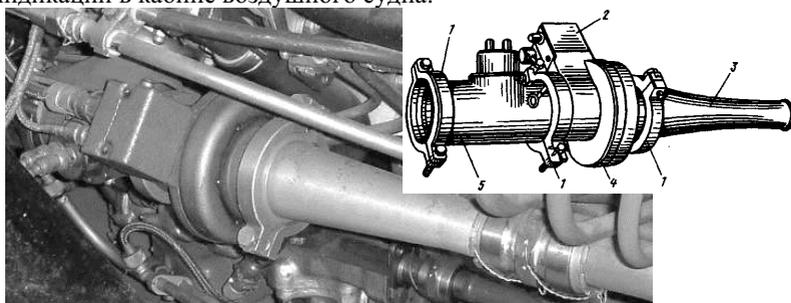


Рис. 26. Датчик расходомера и датчик плотномера

1 - хомут, 2 - кожух датчика расходомера; 3 - патрубок приемный;
4 - датчик расходомера; 5 - датчик плотномера

Принцип действия расходомера заключается в том, что топливо при своем движении приводит во вращение крыльчатку, скорость вращения которой пропорциональна часовому расходу топлива, а частота вращения — количеству протекающего через датчик топлива в объемных единицах.

Датчик плотномера осуществляет коррекцию показания расходомера в зависимости от изменения плотности топлива.

Дифференциальный сигнализатор контролирует состояние топливного фильтра *ТМР* выдачей команды на включение сигнальной лампы при достижении определенного перепада давлений топлива на фильтре.

Давление топлива перед насосом высокого давления и в контурах рабочих форсунок измеряется датчиками давления. Во многих системах, так же сигнализируется минимальное давление топлива с использованием соответствующего датчика – рис. 27.

Обозначения перечисленных элементов контроля на принципиальных гидравлических схемах представлены на рис. 3,4.



1-датчик давления топлива на входе в насос-регулятор;
2-датчик сигнализатора минимального давления топлива;
3-датчик перепада давления на топливном фильтре

Рис. 27. Примеры размещения датчиков топливной системы ТРДД типа Д-30КП

4. Характерные неисправности элементов топливных систем и некоторые способы их предупреждения

Основная часть неисправностей элементов топливных систем обусловлена проявлением неблагоприятных свойств топлива, которые могут оказывать повреждающее действие и на элементы конструкции двигателя (камеру сгорания, турбину и др.). Возможно возникновение неисправностей топливных агрегатов из-за внешних объективных или субъективных причин, например, под действием вибраций, передаваемых от двигателя, или в результате нарушений технологии технического обслуживания системы.

Вследствие обратимой гигроскопичности авиационного топлива при снижении температуры происходит выделение из него растворенной воды в виде мельчайших капель, которые в условиях отрицательных температур быстро замерзают, образуя кристаллы льда, рассредоточенные по всему объему топлива во взвешенном состоянии. Кристаллы льда засоряют фильтр низкого давления, что приводит к существенному увеличению гидравлического сопротивления магистрали и ухудшению кавитационных характеристик основного топливного насоса. Замерзание отстоя воды в полости подкачивающего насоса может вызвать примерзание его ротора к корпусу и разрушение валика привода насоса при запуске двигателя. Для предотвращения образования кристаллов льда в топливо добавляют специальные присадки, например, жидкость И в количестве 0,1-0,3% или тетрагидрофуруриловый спирт (жидкость ТГФ) в том же количестве. Добавленные присадки, смешиваясь с каплями эмульсионной воды, образуют антифризы с низкой температурой замерзания. Обмерзание фильтров можно устранить также их обогревом (см. выше). Отстой из полостей насосов и топливомасляного радиатора периодически сливают, а также принимают меры по предотвращению обводнения топлива при его хранении и заправке.

Присутствующие в топливе кислородные, сернистые соединения и вода вызывают коррозию топливных агрегатов. Среди сернистых соединений наиболее агрессивными являются элементарная сера и меркаптаны. Интенсивность коррозионных процессов резко возрастает с увеличением температуры топлива. Коррозионные отложения, откалываясь от поверхности деталей, попадают в топливо в виде нерастворимых осадков, которые засоряют фильтры, а также могут вызвать засорение форсунок, заклинивание прецизионных пар (рис. 28) и повышенный износ узлов трения топливных агрегатов.

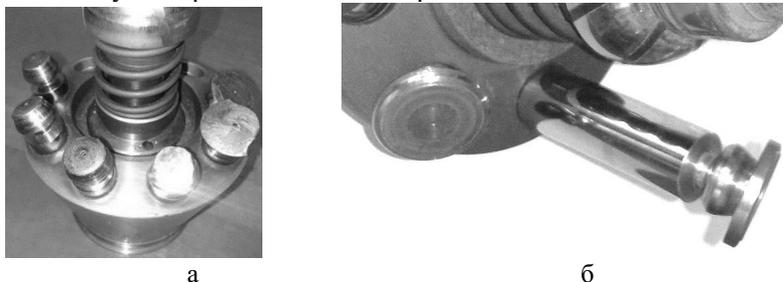


Рис. 28. Плунжерные насосы

а - с заклиниванием поршней, деформациями и разрушениями подпятников;
б - вид исправного поршня в крайних положениях

Наличие в топливе соединений серы и некоторых металлов (например, ванадия и натрия) приводит при его сгорании к возникновению высокотемпературной газовой коррозии на элементах конструкции камер сгорания, турбин и выходных устройств ГТД. Наиболее опасна ванадиевая коррозия, интенсивность которой резко возрастает в присутствии соединений серы и натрия. При высоких температурах (выше 100-110 град.С) происходит выделение из топлива в виде осадка микро загрязнений, сернистых соединений, оксидов металлов, смол и твердых углеродных частиц, образующихся в процессе разложения термически нестабильных фракций. Этот осадок засоряет фильтры, форсунки и вызывает повышенный износ топливных насосов. Температура топлива оказывает существенное влияние на работоспособность центробежных форсунок. Уменьшение температуры вызывает ухудшение распыливания топлива при малых расходах за счет увеличения его плотности и коэффициента расхода. При повышении температуры происходит уменьшение коэффициента расхода и угла конуса распыла. Особенно сильное снижение производительности форсунок (из-за уменьшения коэффициента μ) происходит при температурах 150-200 град.С, вызывающих интенсивное испарение топлива и его кавитацию в распылителях. Столь высокие температуры могут вызвать недопустимый износ узлов трения основных топливных насосов из-за потери топливом своей смазывающей способности. Попадание воздуха в топливную систему (например, при обслуживании агрегатов) может привести к нарушению режимов работы топливных регуляторов, колебаниям частоты вращения ротора и выключению двигателя. Воздух удаляют из топливных

магистралей через специальные клапаны – рис. 29.

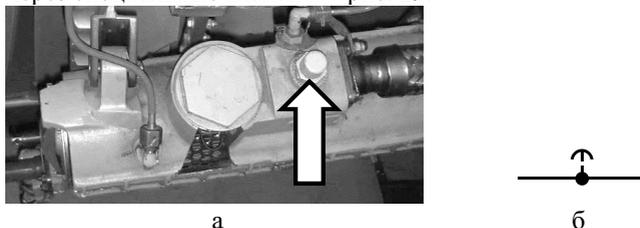


Рис. 29. Расположение клапана стравливания воздуха (закрыт колпачком) на топливо-масляном радиаторе и обозначение на принципиальной схеме

Большое число отказов топливных насосов вызывает износ уплотнений приводных валиков, который сопровождается нарушением герметичности и появлением течи топлива через дренажные штуцера.

Разрушения топливных трубопроводов в результате их колебаний составляют значительную часть всех отказов усталостного происхождения в ГТД. Поломки трубопроводов происходят, как правило, в местах концентрации напряжений: в зонах приварки или припайки ниппелей, по переходу цилиндрического участка трубы в развальцованный конический, под зажимами труб и в местах их максимальной изогнутости. Трещины вдоль образующей трубопровода возникают под действием пульсаций давления топлива, а окружные трещины - в результате циклического изгиба вибрациями, передаваемыми, главным образом, от корпуса двигателя. Снижению усталостной прочности трубопроводов способствуют искажения формы их поперечного сечения, монтажные напряжения, поверхностные повреждения (вмятины, забоины, риски и т. п.). Поэтому к качеству монтажа трубопроводов предъявляют высокие требования.

Для снижения уровня вибронегруженности трубопроводов их отдельные участки «отстраивают» от резонансных режимов, воздействуя на частоты собственных колебаний путем изменения расстояний между опорами. На опорах устанавливают амортизаторы (резиновые, проволочные и др.), которые снижают интенсивность вибраций, передаваемых от корпуса ГТД. Амплитуды пульсаций давления топлива уменьшают с помощью дроссельных пакетов, устанавливаемых в топливных магистралях.

Чтобы температурные деформации трубопроводов и корпуса двигателя не приводили к повреждениям соединений (например, к вытягиванию развальцованного участка трубки из ниппеля), на трубопроводах выполняют термокомпенсационные элементы - рис. 30.

С целью сохранения герметичности соединений трубопроводов для их резьбовых элементов (гаек, болтов) применяют контрольные устройства, препятствующие ослаблению затяжки соединений от вибраций - рис. 31.

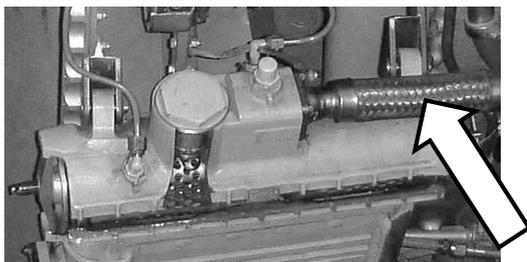


Рис. 30. Пример термокомпенсатора (указан стрелкой) в топливной магистрали ТРДД типа Д30КП

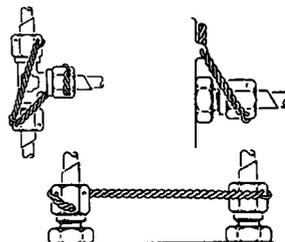


Рис. 31. Примеры контрнения гаек трубопроводов

6. Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение топливной системы авиационного ГТД (далее – топливной системы).
2. Какие требования предъявляют к топливным системам ?
3. Какие функции выполняют топливные системы ?
4. Какие требования предъявляют к топливным системам ?
5. Охарактеризуйте топлива и их свойства .
6. Приведите классификационные признаки топливных систем.
7. Охарактеризуйте магистрали топливных систем и укажите перечень агрегатов.
8. Поясните связь между типом камеры сгорания и особенностями конструкции топливной системы.
9. Какие типы насосов применяют в топливных системах, их особенности, преимущества и недостатки ?
10. Опишите характеристики топливных насосов.
11. Опишите характеристики топливных форсунок. Что представляет из себя расходная характеристика двухконтурной центробежной форсунки?
12. Что понимают под производительностью топливного насоса и что ее определяет (с расчетными отношениями для насосов различных типов)?
13. Опишите способы регулирования производительности топливных насосов различных типов.

14. В чем состоит различие между пожарным и стоп-краном топливной системы ?
15. Опишите конструкцию и работу центробежных насосов топливных систем.
16. Опишите конструкцию и работу шестеренных насосов топливных систем.
17. Опишите конструкцию и работу плунжерных насосов топливных систем.
18. Опишите конструкцию и работу двойных насосов топливных систем.
19. Опишите конструктивные решения, обеспечивающие необходимую высоту топливных систем.
20. Опишите конструкцию и работу автоматических распределителей топлива.
21. Опишите конструктивные решения, обеспечивающие пожарную безопасность топливных систем.
22. Опишите конструкцию и работу свечей зажигания и пусковых воспламенителей.
23. Опишите конструкцию и работу фильтров топливных систем.
24. Опишите конструкцию и работу систем дренажа.
25. Опишите конструкцию и работу топливно-масляных и воздушно-масляных радиаторов топливных систем.
26. Опишите конструкцию и работу подогревателей топливных систем.
27. Дайте классификацию и опишите конструкцию и работу форсунок топливных систем.
28. Охарактеризуйте способы предотвращения появления льда в топливных системах.
29. Охарактеризуйте состав и особенности работы основных элементов контрольно-измерительной аппаратуры топливных систем.
30. Укажите на образцах авиационной техники места размещения дренажных баков.
31. Охарактеризуйте типичные значения параметров топливных систем.
32. Охарактеризуйте способы предотвращения опасных резонансных колебаний трубопроводов топливных систем.
33. Охарактеризуйте типичные неисправности топливных систем, способы их предупреждения, обнаружения и устранения.
34. Как связана работа топливных систем с процедурами холодной прокрутки и ложного запуска двигателя?
35. Как изображаются на принципиальных гидравлических схемах агрегаты, элементы управления и контроля ?
36. Охарактеризуйте основные процедуры по техническому обслуживанию топливных систем.
37. Способы обеспечения эксплуатационной надежности топливных систем?
38. Способы обеспечения эксплуатационной технологичности топливных систем?
39. Контроль технического состояния топливных систем в эксплуатации?

40. Выполните необходимые измерения, расчет и построение характеристики предоставленного экземпляра центробежного насоса.
41. Выполните необходимые измерения, расчет и построение характеристики предоставленного экземпляра плунжерного насоса.
42. Выполните необходимые измерения и расчет собственных частот колебаний предложенного прямолинейного участка трубопровода топливной системы большого диаметра.
43. Укажите на образцах авиационной техники лабораторий кафедры ДЛА агрегаты магистрали низкого давления топлива и опишите их.
44. Укажите на образцах авиационной техники лабораторий кафедры ДЛА агрегаты магистрали высокого давления топлива и опишите их.
45. Укажите на образцах авиационной техники лабораторий кафедры ДЛА агрегаты магистрали пускового топлива и опишите их.
46. Опишите конструкцию и работу агрегата топливной системы по указанию преподавателя.

Литература

1. Иноземцев А.А. и др. Авиационный двигатель ПС-90А. - М.:Либра-К, 2007.
2. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели.-ОАО "Авиадвигатель".-Пермь, 2006.
3. Лозицкий Л.П. и др. Конструкция и прочность авиационных газотурбинных двигателей. -М.: Воздушный транспорт, 1992.
4. Лозицкий Л.П. и др. Авиационные двухконтурные двигатели Д-30КУ и Д-30КП. – М.: Машиностроение, 1988.
5. Павловский Н.И. Вспомогательные силовые установки самолетов. – М.:Транспорт, 1977.
6. Фельдман Е. Л., Черкасов Л. А. Авиационный двухконтурный двигатель НК-86: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1982.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Общие сведения о топливных системах.....	4
2. Типовые схемы топливных систем.....	5
3. Основные агрегаты и контрольно-измерительная аппаратура топливных систем.....	12
3.1. Типы топливных насосов, их сравнительная оценка и области применения, характеристики.....	12
3.1.1. Центробежные топливные насосы.....	13
3.1.2. Шестеренчатые топливные насосы.....	15
3.1.3. Двойные топливные насосы.....	17
3.1.4. Плунжерные топливные насосы.....	19
3.2. Топливо-масляные радиаторы.....	23
3.3. Топливные фильтры и подогреватели.....	25
3.4. Топливные форсунки.....	27
3.4.1. Нерегулируемые центробежные форсунки.....	28
3.4.2. Регулируемые центробежные форсунки.....	30
3.5. Автоматический распределитель топлива.....	32
3.6. Основная контрольно-измерительная аппаратура, используемая в топливных системах.....	33
4. Характерные неисправности элементов топливных систем и некоторые способы их предупреждения.....	34
5. Контрольные вопросы и задания.....	37
Литература.....	39