

Система топливопитания двигателя и ее влияние на работу автоматики с учетом физико-механических свойств различных топлив¹

Денисова Е.В., Черникова М.А.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

Рассматривается система топливопитания на примере короткоресурсного турбореактивного двигателя с целью определения влияния системы на работу автоматики летательного аппарата. Для этого представлена схема системы топливопитания двигателя и отображены её основные элементы. Описаны особенности функционирования агрегата дозирования топлива в процессе полета летательного аппарата, а также свойства авиационных топлив, такие как: вязкость, плотность, термостабильность, насыщенность топлива воздухом, сжимаемость и чистота топлива. На основе анализа приведенных особенностей и свойств топлива определено, что основное влияние на работу автоматики оказывает такой процесс, как гидродинамическая кавитация, а также положительная обратная связь.

Ключевые слова: система топливопитания, турбореактивный двигатель, трение, кавитация, свойства топлив

1. Введение

Система топливопитания (СТ) двигателя является неотъемлемой частью летательного аппарата (ЛА). Сложные процессы, происходящие в СТ при работе ЛА, сказываются на работе всей системы автоматического управления (САУ) таким аппаратом. Влияние свойств авиационных топлив на работу СТ может привести к нестабильной работе двигателя, а значит и к потере управляемости, что недопустимо. Таким образом, анализ свойств топлив, используемых при эксплуатации, является актуальной задачей.

Целью работы является определение влияния работы СТ двигателя на работу автоматики.

2. Система топливопитания

В процессе эксплуатации двигателей различного назначения, но особенно короткоресурсных двигателей, выявлены зависимости устойчивости работы САУ ЛА от температуры топлива [1].

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-01-97019-р_поволжье_а, 14-08-97027-р_поволжье_а) и АН РБ (договора №№ 40/11-П, 40/59-П).

С целью анализа такой зависимости рассмотрим принципиальную схему СТ на примере короткоресурсного турбореактивного двигателя (ТРД) (рис. 1).

Схема функционирует следующим образом. Из топливного бака топливо выдавливается инертным газом (азотом или гелием). Хотя на схеме топливный бак показан в единственном экземпляре, на самом деле их несколько. Топливо дозируется в соответствии с циклограммой: немного из 1-го, затем из 6-го, затем из 2-го и т.д. [2], для предотвращения смещения центра тяжести ЛА. Далее, через систему фильтров топливо попадает на вход качающего узла. Конструктивно качающий узел есть не что иное, как обыкновенный насос шестеренчатого, плунжерного или центробежного вида. На беспилотных ЛА используются чаще всего шестеренчатые насосы, их преимуществом является соотношение производительности, габаритов и веса при минимальных величинах последних. К недостаткам данного вида насосов следует отнести тот факт, что при постоянной частоте вращения их производительность тоже есть величина постоянная. Поскольку, чаще всего, качающий узел приводится во вращение от двигателя, то, согласно рис. 1, появляется местная положительная обратная связь, ко-

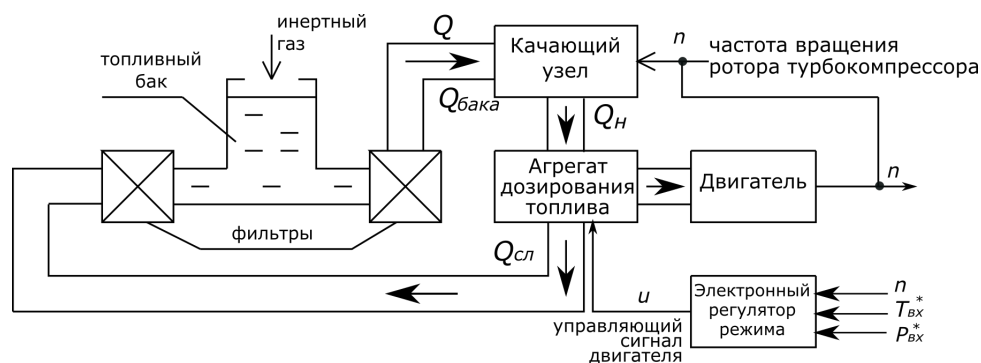


Рис. 1. Принципиальная схема системы топливопитания короткоресурсного ТРД

торую необходимо учитывать при проектировании САУ в целом.

Данное утверждение рассмотрим более подробно дальше, а здесь продолжим разбор принципиальной схемы.

Топливо от качающего узла (Q_H) поступает в агрегат дозирования топлива (АДТ).

Основной перечень элементов, из которых состоит АДТ:

- клапан постоянного давления (КПД), выполняющий роль гидростабилизатора для поддержания постоянной величины давления на регулировочных элементах;
- сервопоршень дроссельной иглы – силовой элемент, обеспечивающий перемещение дозирующей иглы по сигналу электронного регулятора режима двигателя;
- дроссельная игла;
- клапан постоянного перепада, обеспечивающий поддержание постоянной величиной разницы давлений на кромках дозирующей иглы;
- распределительный клапан, распределяющий топливо по контурам топливного коллектора (или нескольких коллекторов).

Дополнительно могут быть использованы еще и следующие элементы:

- гидроусилитель (их иногда еще называют золотниками);
- дифференцирующие клапана;
- счетно-решающие элементы, причем их применяют, в основном, в резервных гидромеханических системах;
- гидрореле;
- ограничители нарастания давления и т.д.

Назначение АДТ — обеспечить то потребное количество топлива в двигатель, которое необходимо для поддержания его параметров, при условии изменения высоты и скорости полета. Поясним более подробно работу АДТ при различных высотах и скоростях полета ЛА.

В процессе полета беспилотного ЛА выдерживается программа управления $n = n_{\max} = \text{const}$, где n — частота вращения ротора турбокомпрессора. При этом ЛА совершает маневры: летит около земли с максимальной скоростью или поднимается на высоту и далее парит до появления цели. При $n_{\max} = \text{const}$ расход топлива в двигатель меняется от нескольких десятков кг/час до 0,1...0,2 кг/час. Скорость же вращения турбокомпрессора должна быть постоянной. Перепуск избытка топлива осуществляет КПД, т.к. шестеренчатый насос имеет постоянную производительность. Другими словами, топливо циркулирует по кругу: из бака в качающий узел, потом в АДТ и снова через систему фильтров в бак.

Рассмотрим свойства применяемых топлив и их влияние на характеристики системы в целом.

3. Свойства авиационных топлив

Для питания ТРД применяются жидкие углеводородные топлива, являющиеся продуктами перегонки нефти. К ним предъявляются следующие требования:

- обеспечение оптимальных характеристик рабочего процесса;
- пригодность для эксплуатации в системах подачи топлива;
- возможность производства их в больших количествах.

Авиационные топлива должны иметь высокий коэффициент полноты сгорания, хорошие испаряемость и воспламенение, большую теплотворную способность, отсутствие нагарообразования и разъедания деталей двигателя, термическую стабильность, низкую температуру замерзания и возможность эксплуатации при большом диапазоне температур и т.п. Эти требования, как правило, несовместимы, поэтому каждый раз подбирается сорт топлива в зависимости от назначения ТРД и ЛА.

Смешение топлив различных сортов не допускается. Исключение составляет только аварийная дозаправка ЛА. Теплотворная способность авиационных керосинов колеблется в пределах 10300 – 10600 ккал/кг.

При проектировании топливной автоматики следует учитывать свойства керосина как жидкости, которую необходимо подавать в камеру сгорания двигателя.

Для работы различных элементов автоматики двигателя необходима рабочая жидкость. В этом качестве могут быть использованы минеральное масло или топливо. Чаще всего используют топливо, т.к. создание еще и дополнительной маслосистемы существенным образом сказывается на габаритах и весе ЛА.

3.1. Плотность топлива ρ [кг/м³]

Объемное количество топлива, которое необходимо подать в двигатель, зависит от плотности. Плотностью также определяется и Количество топлива, которое необходимо подать в двигатель, зависит от его плотности. Для различных сортов топлива плотность колеблется от 0,75 до 0,84 кг/литр при $t = 200$ С.

Изменение плотности топлива в зависимости от температуры оказывает существенное влияние на точность работы элементов топливной автоматики и требует специальной коррекции, что необходимо учитывать при синтезе алгоритмов управления ТРД.

3.2. Вязкость

С уменьшением вязкости увеличиваются силы трения в отдельных деталях системы регулирования, что приводит к повышению износа и снижению ресурса нагруженных элементов. Особенно это относится к деталям топливных насосов.

Изменение вязкости вызывает изменение характеристик дозирующих элементов и утечек топлива по зазорам.

Увеличение вязкости ухудшает распыл топлива и смесеобразование в камере сгорания двигателя и его запуск.

3.3. Термостабильность топлива

Под термостабильностью топлива понимается его способность сохранять свои свойства при увеличении температуры.

При полете на больших скоростях ($M > 2,5$, где M – число Маха) происходит подогрев топлива в баках вследствие увеличения температуры наружного воздуха ($t_{вх}^*$) из-за его аэродинамического нагрева. Например, при $M = 2,5$ $t_{вх}^* > 205^\circ$ С.

Температура топлива (t_T) в баках при этом будет зависеть от длительности полета, теплоизоляции баков и т.д. Однако, к концу полета она может возрасти достаточно сильно и приблизиться к точке кипения ($t_T \approx 190^\circ$ С). Топливо на большинстве двигателей служит еще и хладагентом для охлаждения масла, циркулирующего в маслосистеме двигателя.

Подогрев топлива происходит и в топливных насосах, поэтому t_T на форсунках может достигать величины 150–250° С. При этих температурах происходят процессы окисления присутствующих в топливе неуглеродных соединений, содержащих серу, азот, кислород.

3.4. Насыщенность топлива воздухом

Одним из свойств авиационных топлив является способность растворять в себе газы, в частности, воздух. Воздух может находиться в топливе в растворенном и в примешанном состоянии. В первом случае молекулы воздуха располагаются в межмолекулярном пространстве жидкости. Во втором — они находятся в топливе в виде пузырьков очень малых размеров.

Процесс растворения воздуха происходит при наличии свободного пространства, не занятого топливом. Общее количество растворенного воздуха достигает 18% при давлении $P = 1$ атм, $t = 20^\circ$ С (топливо ТС-2). Растворимость воздуха увеличивается почти прямо пропорционально увеличению давления и при повышении температуры. Удалить воздух простыми техническими средствами не удается.

В топливных системах могут быть полости, где топливо, соприкасаясь с воздухом, увлекает его за собой в виде мельчайших пузырьков. В дальнейшем этот воздух может растворяться и выделяться из топлива, скапливаясь в тупиковых полостях топливного агрегата. Этот факт влияет на работу топливной аппаратуры весьма существенным образом. Воздух повышает окисляемость топлива, снижает вязкость керосина, производительность топливных насосов, ухудшает их кавитационные характеристики.

При снижении давления в топливной системе воздух начинает выделяться из топлива, образуя местные воздушные пузыри и пробки. Объем выделяемого воздуха может быть достаточно велик, если учитывать его расширение вследствие уменьшения давления. Гидродинамическая кавитация может происходить при резком изменении проходных сечений топливных каналов, поворотах топливных каналов и других условиях, которые вызывают падение давления в потоке жидкости.

Наличие воздушных и паровых пробок изменяет характер течения и работу топливной аппаратуры в целом, в системе могут возникнуть автоколебания, пульсации и, как следствие, происходит искажение статических и динамических характеристик агрегатов топливопитания как элементов САУ.

3.5. Сжимаемость

Под сжимаемостью понимают свойство жидкости изменять свой объем под действием давления.

Принято считать, что в пределах рабочих давлений и температур сжимаемостью топлива (керосина) можно пренебречь. Однако, на сжимаемость весьма существенно влияет наличие воздуха, особенно примешанного. Чем больше в топливе воздуха, тем больше его сжимаемость.

Экспериментально установлено, что наличие всего 1% воздуха снижает модуль упругости более, чем в два раза.

3.6. Чистота топлива

Авиационные керосины растворяют воду. Растворимость воды прямо пропорциональна влажности окружающей среды и зависит от температуры керосина.

С понижением температуры содержание растворенной воды резко снижается. При $t < 0^\circ$ С вода выделяется в виде кристалликов льда и забивает регулировочные отверстия, фильтры, трубопроводы. Хотя содержание воды в топливе очень незначительно, но при больших расходах топлива это может привести к прекращению подачи топлива в двигатель, т.е. к аварийной остановке.

Механические примеси также могут попасть в топливо и привести к остановке двигателя. Содержание механических частиц не должно превышать 0,0002% от общей массы; тонкость фильтрации — 5 мк.

Детали поверхностей, на которые действует сила трения, а также вращающиеся детали насосов должны быть изготовлены из высокопрочных материалов. В противном случае частицы металла попадают в регулировочные жиклеры и могут привести к потере работоспособности топливных элементов. Согласно мировым статистическим данным 73% авиационных аварий происходит именно из-за отказа элементов топливной аппаратуры.

Ранее проводились следующие исследования для оценки влияния физико-механических свойств топлива:

1. Оценка влияния сил трения в сочетании жесткости пружины на динамику движения поршня [3].

2. Оценка влияния кавитации на СТ и на работу всей системы САУ [4].

3. Влияние положительной обратной связи должно быть компенсировано при выборе алгоритмов управления.

В настоящее время существует тенденция к электрификации двигателей, что дает возможность работать СТ от электродвигателя с генератором на борту ЛА. Такое направление обусловлено идеей создания электрического самолета. Для этого в СТ разорвана положительная обратная связь между двигателем и качающим узлом, но при этом происходит утяжеление самой СТ [5].

4. Заключение

В статье рассмотрена структура СТ для короткоресурсного ТРД, представлены физико-механические свойства для различных топлив. Описание этих свойств показывает, что для различных топлив и режимов работы СТ существует необходимость их учета. Ранее в совместных с авторами работах были проведены исследования, подтверждающие необходимость учета динамики СТ при синтезе алгоритмов управления. В существующих САУ не происходит учет этих факторов, что приводит к нестабильной работе системы, появлению автоколебательных режимов, что недопустимо по условиям эксплуатации ЛА. Необходим новый подход к синтезу алгоритмов управления ТРД и ЛА, основанный на введении математических моделей как самого ТРД, так и СТ.

Данная статья носит обзорный характер, дальнейшие исследования предполагается проводить в рамках описанных проблем.

Список литературы

- [1] Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД / С.Т. Кусимов, Б.Г. Ильясов, В.И. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1999. 609 с.
- [2] Шляхтенко С.М. Теория радио-воздушных реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1975. 568 с.
- [3] Денисова Е.В., Насибуллаева Э.Ш., Насибуллаев И.Ш. Исследование динамических процессов в элементах топливной автоматики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 5(158). С. 31–36.
- [4] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш., Денисова Е.В. Динамика течения жидкости в технических системах с жиклерами // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 4. С. 20–25.
- [5] Научный вклад в создание авиационных двигателей. В двух книгах. Книга 1 НЗ4 / Колл.авторов; Под общей редакцией В.А. Скибина и В.И. Соломина. М.: Машиностроение, 2000. 725 с.

Fuel supply system of engines and its impact on the performance of automation with regard to physical and mechanical properties of different fuels

Denisova E.V., Chernikova M.A.

Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

The fuel supply system on the example of the short-resource turbojet engine is considered aiming to determine the impact on the automation system of aircrafts. For this purpose, the fuel supply circuit of an engine is presented and its basic elements are displayed. Features of the functioning of the fuel metering unit during the aircraft flight process are described, as well as the properties of aviation fuels, such as viscosity, density, thermal stability, saturation by air, compressibility, and fuel purity. Based on the analysis of the fuel characteristics and properties it is ascertained that such process as hydrodynamic cavitation, as well as positive feedback, exert key influence on the automation functioning.

Keywords: fuel supply system, turbojet engine, friction, cavitation, properties of fuels

