



УДК 681.51

# ПОЛНОРАЗМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АГРЕГАТА ДОЗИРОВАНИЯ ТОПЛИВА<sup>1</sup>

*Насибуллаева Э. Ш.\**, *Денисова Е. В.\**,  
*Насибуллаев И. Ш.\*\**

\*Институт механики УНЦ РАН, Уфа

\*\*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

**Аннотация.** В работе представлена нелинейная математическая модель функционирования агрегата дозирования топлива, учитывающая работу распределительного клапана, который включает в себя два поршня и три топливных контура. Предложена методика определения начальных условий для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей перемещения сервопоршня, поршня клапана постоянного перепада давлений и поршней распределительного клапана.

## 1. Введение

Практический опыт эксплуатации систем управления газотурбинным двигателем показал необходимость исследования динамических характеристик устройства дозирования топлива с учетом распределения его по контурам топливного коллектора до поступления в камеру сгорания.

Целью настоящей работы является получение нелинейной математической модели агрегата дозирования топлива (АДТ), учитывающей распределение его по контурам, что в дальнейшем будет использоваться при проектировании системы автоматического управления газотурбинным двигателем.

---

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОЭММПУ РАН (проект № 15) и РФФИ (гранты №№ 11-01-97007, 11-08-00823, 11-08-97046)

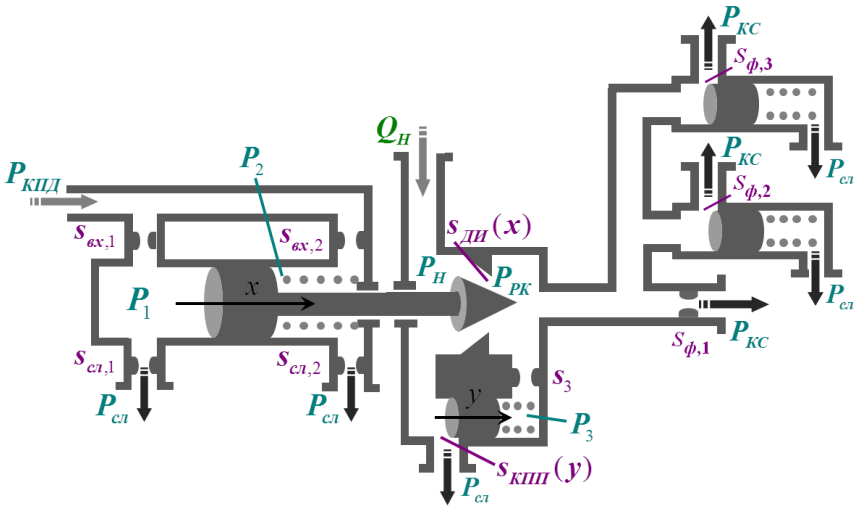


Рис. 1. Конструктивная схема АДТ в силовую установку БЛА

## 2. Постановка задачи

Моделирование АДТ авторами данной работы осуществлялось в несколько этапов:

- на первом этапе рассматривалось движение только одного основного элемента — сервопоршня дроссельной иглы [1];
- на втором этапе была решена задача, в конструктивную схему которой были введены еще два основных элемента — дроссельная игла и клапан постоянного перепада (КПП) [2];
- на третьем этапе решения задачи моделирования, представленном в данной работе, в схему был введен распределительный клапан, включающий в себя два поршня и три топливных контура.

Конструктивная схема АДТ в силовую установку беспилотного летательного аппарата (БЛА) приведена на рис. 1. Основное описание работы данного устройства представлено в работе [2]. Здесь остановимся подробно только на работе распределительного клапана.

Конструктивно распределительный клапан представляет собой совокупность нескольких поршней (два и более), за счет перемещения которых открывается (или закрывается) полость, через которую в топливный коллектор поступает топливо. Чаще всего топливный коллектор содержит три контура:

– первый — дежурный — нерегулируемый контур, через него топливо поступает всегда, от момента запуска до выхода на режим;

– второй контур — открывается по мере необходимости в увеличении расхода топлива в двигатель, этот контур наиболее нагруженный;

– третий контур — подключается при необходимости вывода двигателя на максимальный режим.

### 3. Математическая модель АДТ, учитывающая работу распределительного клапана

Математические модели полостей сервопоршня и дроссельной иглы без учета работы распределительного клапана представлены в работах [1, 2].

В данной работе представим математическую модель функционирования полости дроссельной иглы с учетом еще одного основного элемента АДТ, а именно, распределительного клапана.

Уравнение баланса расходов жидкости всей системы имеет следующий вид:

$$Q_H = Q_{КПП} + Q_T(P_{PK}), \quad (1)$$

где  $Q_H = \text{const}$  — расход топлива, поступающего от шестеренчатого насоса;  $Q_{КПП}$  — расход топлива, которое уходит на перепуск обратно в топливный бак через полость КПП, и определяется следующей формулой

$$Q_{КПП} = a\mu s_{КПП}(y)\sqrt{P_H - P_{сл}};$$

$a = \sqrt{2g/\gamma}$  — размерный коэффициент, зависящий от удельного веса топлива (жидкости)  $\gamma$ ;  $g$  — ускорение свободного падения;

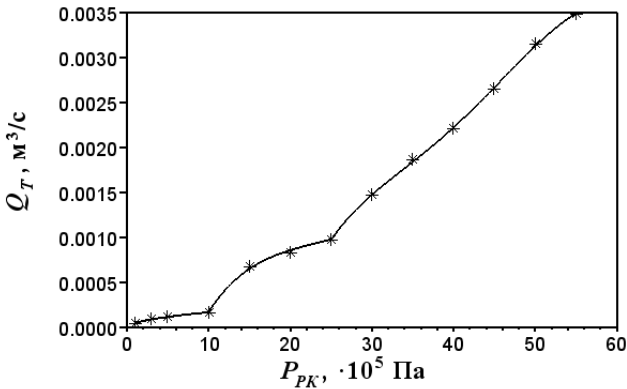


Рис. 2. Зависимость расхода топлива в камеру сгорания от давления перед распределительным клапаном:  
 «\*» — экспериментальные данные [3];  
 «—» — аппроксимация

$\mu$  — коэффициент истечения, который в первом приближении можно считать постоянной величиной, хотя фактически зависит от вида жиклера;  $s_{КПП} = s_{КПП}(y)$  — площадь сечения слива, образуемая поршнем КПП;  $y = y(t)$  — функция перемещения поршня КПП;  $P_H$  — давление слева от поршня КПП;  $P_{сл}$  — давление слива;  $Q_T = Q_T(P_{PK})$  — расход топлива, поступающего в двигатель через распределительный клапан;  $P_{PK}$  — давление перед распределительным клапаном.

Распределительный клапан конструктивно представляет собой поршень, по сути аналогичный дроссельной игле. Поэтому вывод уравнений, описывающих его работу, не представляется необходимым. Поскольку их решения совпадают с экспериментальными данными [3], то необходимый расход топлива  $Q_T$  как функцию давления  $P_{PK}$  можно определить с помощью аппроксимации этих данных (см. рис. 2).

В отличие от модели, представленной в работе [2], на данном этапе при моделировании полости дроссельной иглы счита-

ли, что давление в камере сгорания  $P_{\text{КС}}$  является переменной величиной. Расход топлива в камеру сгорания  $Q_{\text{ф},i}$  через форсунки  $s_{\text{ф},i}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) определялось по заданной характеристике распределительного клапана [3]. Аппроксимация расходов топлива проводилась линейным методом наименьших квадратов [4]. Получено, что суммарная невязка, с учетом погрешностей округления, получается наименьшей для  $Q_{\text{ф},1}$  в виде полинома 6-го порядка, для  $Q_{\text{ф},2}$  в виде полинома 5-го порядка и для  $Q_{\text{ф},3}$  в виде полинома 4-го порядка. При этом максимальная относительная погрешность составляла менее 1%. Результат аппроксимации данными полиномами для  $Q_{\text{Т}} = \sum_{i=1}^3 Q_{\text{ф},i}$  приведен на рис. 2 (сплошная линия). На данном рисунке символами «\*» обозначены экспериментальные точки зависимости общего расхода топлива  $Q_{\text{Т}}$  от давления перед распределительным клапаном  $P_{\text{РК}}$ .

Уравнение баланса расходов жидкости, поступающей в правую полость дроссельной иглы, имеет следующий вид:

$$Q_{\text{ди}} + Q_3 = Q_{\text{Т}}(P_{\text{РК}}), \quad (2)$$

где  $Q_{\text{ди}}$  — расход топлива, поступающего в правую полость дозирующей иглы, и определяемого по следующей формуле:

$$Q_{\text{ди}} = a\mu s_{\text{ди}}(x)\sqrt{P_{\text{Н}} - P_{\text{РК}}};$$

$s_{\text{ди}} = s_{\text{ди}}(x)$  — площадь прохода жидкости в сечении дозирующей иглы;  $x = x(t)$  — функция перемещения сервопоршня;  $Q_3$  — расход топлива через жиклер  $s_3$ , который вычисляется по следующей формуле:

$$Q_3 = \text{sign}(\dot{y})a\mu s_3\sqrt{|P_3 - P_{\text{РК}}|};$$

$s_3$  — площадь прохода жидкости на входе в полость КПП справа от поршня;  $P_3$  — давление справа от поршня КПП.

Расход топлива в правой полости КПП определяется по формуле:

$$Q_3 = \Delta Q, \quad (3)$$

где  $\Delta Q = S_{\text{КПП}}\dot{y}$  — изменение расхода за счёт смещения поршня КПП, т.е. за счёт освобождения дополнительного объёма в правой полости КПП;  $S_{\text{КПП}}$  — площадь поршня КПП.

Решение системы уравнений (1)–(3) дает следующие формулы для определения давлений в различных полостях:

$$\begin{aligned} P_{\text{РК}} &= P_{\text{сл}} + \left( \frac{Q_{\text{Н}} - Q_{\text{Т}}(P_{\text{РК}})}{a\mu s_{\text{КПП}}(y)} \right)^2 - \left( \frac{Q_{\text{Т}}(P_{\text{РК}}) - S_{\text{КПП}}\dot{y}}{a\mu s_{\text{ДИ}}(x)} \right)^2, \\ P_3 &= \text{sign}(\dot{y}) \left( \frac{S_{\text{КПП}}\dot{y}}{a\mu s_3} \right)^2, \\ P_{\text{Н}} &= P_{\text{сл}} + \left( \frac{Q_{\text{Н}} - Q_{\text{Т}}(P_{\text{РК}})}{a\mu s_{\text{КПП}}(y)} \right)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Заметим, что первое уравнение в (4) является нелинейным уравнением относительно  $P_{\text{РК}}$ . Для его решения можно использовать, например, метод Ньютона–Рафсона [4].

#### 4. Определение начальных условий

Начальные условия задаются следующим образом:

$$x(0) = x_0, \quad \dot{x}(0) = 0, \quad y(0) = y_0, \quad \dot{y}(0) = 0.$$

Значения  $x_0$ ,  $y_0$  определяются из условия, что в начальный момент времени  $t = 0$  система находится в стационарном состоянии. В стационарном состоянии система имеет следующий вид. Заслонка, которая открывает или закрывает проход топлива через жиклер  $s_{\text{сл},1}$  по сигналу, поступающему от электронного регулятора режима работы двигателя на электромагнитный клапан, открыта полностью. Двигатель работает в «холостом» режиме, то есть в камеру сгорания поступает постоянный расход топлива  $Q_{\text{Т}} = \text{const} \equiv Q_{\text{Т}}^{(\text{stat})}$ ; сервопоршень дроссельной иглы и поршень КПП неподвижны, причем сервопоршень устанавливается в положение  $x = x_0$  (как правило, примерно в середине полости) с помощью затяжки пружины. Разность давлений  $P_{\text{Н}}$  и  $P_{\text{РК}}$ , которая должна поддерживаться клапаном постоянного перепада давлений примерно на одном уровне, равна  $P_{\text{Н}} - P_{\text{РК}} = \Delta P$  (условие

$\Delta P = \text{const}$  в пределах небольшой погрешности может использоваться в качестве контрольного при определении достоверности полученных результатов).

Таким образом, из уравнения (3) получим, что  $Q_3 \equiv 0$ , т.е.  $P_3(0) = P_{PK}(0) \equiv P_{PK}^0$ . Тогда из уравнения (2) получим формулу для определения площади прохода топлива через дозирующую иглу

$$s_{ДИ}(x_0) = \frac{Q_T^{(stat)}}{a\mu\sqrt{\Delta P}},$$

с помощью которой можно вычислить  $x_0$ . Например, если профиль окна дозирующей иглы имеет форму круга площадью  $s_{ДИ}^{\max}$  [2], то

$$x_0 = h_x \sqrt{1 - \frac{s_{ДИ}(x_0)}{s_{ДИ}^{\max}}}.$$

Далее, определяется давление  $P_{PK}^0$  с помощью аппроксимационной линии (см. рис. 2) из условия  $Q_T(P_{PK}^0) = Q_T^{(stat)}$ , а следовательно, и давление  $P_H(0) \equiv P_H^0 = P_{PK}^0 + \Delta P$ . Из уравнения (1) находится площадь прохода жидкости через КПП в начальный момент времени

$$s_{КПП}(y_0) = \frac{Q_H - Q_T^{(stat)}}{a\mu\sqrt{P_H^0 - P_{сл}}},$$

и, наконец, значение  $y_0$ . Например, если профиль окна слива имеет форму круга с диаметром  $d_{сл}$ , то  $y_0$  определяется из решения трансцендентного уравнения [2]

$$s_{КПП}(y_0) = \frac{d_{сл}^2}{4} \arccos\left(\frac{d_{сл} - 2y_0}{d_{сл}}\right) - \frac{d_{сл} - 2y_0}{2} \sqrt{d_{сл}y_0 - y_0^2}.$$

## 5. Заключение

В данной работе представлена полноразмерная математическая модель функционирования агрегата дозирования топлива,

включающая помимо трех основных элементов — сервопоршня дозирующей иглы, дозирующей иглы и клапана постоянного перепада давления, также четвертый основной элемент — распределительный клапан, состоящий из трех топливных контуров. Расход топлива в камеру сгорания определялся по заданной характеристике распределительного клапана с помощью аппроксимации экспериментальных данных. Предложена методика определения начальных условий для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей перемещения сервопоршня  $x(t)$  и поршня КПП  $y(t)$  и приведенной, например, в работах [1, 2].

### Список литературы

- [1] Денисова Е. В., Насибуллаева Э. Ш. Расчет статических характеристик гидромеханического элемента дозирования топлива // Материалы Международной научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. С. 208–211.
- [2] Денисова Е. В., Насибуллаева Э. Ш. Моделирование задачи функционирования агрегата дозирования топлива // Труды Института механики УНЦ РАН. Вып. 7 / Под ред. С. Ф. Урманчеева. Уфа: Гилем, 2010. С. 118–128.
- [3] Добрынин А. Н. Проектирование гидромеханических систем автоматического регулирования авиадвигателей. Часть 1. М.: ЦИАМ, 1980. 417 с.
- [4] Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1989. 432 с.