Пусть за время, равное 0,01 с, из соплового отверстия вытекает 0,17 г азотной кислоты плотностью 1400 кг/м^3. Диаметр соплового отверстия 1 мм. Объемное количество азотной кислоты, вытекающее через одну форсунку за 0,01 с, будет равно 0,12 см^3 (0,17/1,4 = 0,12), или 120 мм^3.

При среднем диаметре капли в 700 мкм, или 0,7 мм ее объём составит $V_к = 1/6 \cdot 3,14 \cdot 0,7^3 = 0,18$ мм^3, а количество капель $n_к$ в объеме распыленного топлива будет равно 666 (120/0,18).

При площади поверхности одной капли $S_к = 3,14 \cdot 0,7^2 = 1,5$ мм^2 общая поверхность распыленного топлива $S_о$ составит 1000 мм^2 (666·1,5).

При скорости вытекающей жидкости 18,7 м/с за время 0,01с факел пройдет путь, равный $L_ф = \tau \cdot \vartheta_{стр} = 0,01 \cdot 18,7 = 0,186$ м.

В заключение следует отметить, что в представленной работе приведены физические характеристики топлив и окислителей, дана методика выбора диаметра соплового отверстия форсунки по перепаду давления и необходимому расходу жидкости с использованием номограммы.

Приведены расчетные формулы, позволяющее определять размеры распылителей, число форсунок, мелкость распыливания (средний диаметр капель), пройденный путь факела, величину его конуса, количество капель, общую поверхность распыленной жидкости. Даны примеры расчетов.

Библиографический список

1. Ракетные двигатели / М. Баррель [и др.] ; перевод с англ. — М. : Гос. науч.-техн. изд-во Оборонгиз, 1962. — 800 с.

2. Справочник азотчика. — Изд. 2-е, перераб. / под ред. Мельникова Е.Я. — М. : Химия, 1987. — 464 с.

3. Алексеев, В.П. Физические основы процессов в камерах сгорания поршневых ДВС : учеб. пособие по курсу «Теория рабочих процессов комбинированных ДВС» / В.П. Алексеев, Д.Н. Вырубов. — М. : МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977 — 84 с.

4. Лышевский, А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях / А.С. Лышевский . — Л. : Судостроение, 1971. — 200 с.

5. Левин, В.Г. Физико-техническая гидродинамика / В.Г. Левин. — М. : Физматгиз, 1959. — 699 с.

6. Кутовой, В.А. Распыливание топлива дизельными форсунками / В.А. Кутовой. — М. : Машиностроение, 1981. — 119 с.

7. Шалай, В.В. Экспериментальное и теоретическое исследование дальнобойности струи газа поддува / В.В. Шалай [и др.] // Ракетно-космическая техника : науч.-техн. сб. — М. : ЦНТИ Поиск, 1982. - Сер. 7. Вып. 3. — С. 11-15.

ШАЛАЙ Виктор Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспорт и хранение нефти и газа, стандартизация и сертификация», ректор Омского государственного технического университета.

МАКУШЕВ Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии.

Адрес для переписки: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Статья поступила в редакцию 24.12.2009 г.

© В. В. Шалай, Ю. П. Макушев

УДК 681.51(075)+533.665(075)

А. Б. ЯКОВЛЕВ

Омский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В статье рассматриваются статические и динамические характеристики жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ) с насосной системой подачи и автономным топливом для питания турбины. Получена система уравнений динамики, описывающая процессы, происходящие ЖРДУ по каналу управления тягой. Математическая модель позволяет провести анализ и выявить основные закономерности влияния входных величин на управляемую величину, путем подбора коэффициентов получить желаемый вид переходного процесса.

Ключевые слова: жидкостная ракетная двигательная установка, статическая характеристика, динамическая характеристика, регулирование тяги.

Современные жидкостные ракетные двигательные установки (ЖРДУ) — это прежде всего многорежимные, регулируемые в широком диапазоне, системы многократного использования. Но ЖРДУ это и сложная техническая система, которой присущи: большое число составляющих ее элементов, имеющих сложные связи между собой; наличие в своем составе нескольких контуров управления; направленность всех воздействий системы на выполнение одной цели (полетной задачи); проявление своих свойств в динамике (динамическая система) [1].

Таким образом, ЖРДУ является динамическим комплексом, особенностью которого является динамический характер процессов, протекающих во всех

составляющих его элементах, т.е. составляющие его элементы сами по себе являются сложными динамическими звеньями. В связи с этим при проектировании ЖРДУ необходимо уметь анализировать ее динамические свойства, чтобы создавать отдельные узлы с заданными динамическими характеристиками, синтезировать систему автоматического регулирования (САР), избежать возникновения процессов, вызывающих потерю устойчивости. Важным является и выбор наиболее рационального варианта схемы ЖРДУ.

Главной целью работы является определение уравнения динамики ЖРДУ с насосной системой подачи и автономным топливом для питания турбины. Для выполнения указанной цели был применен системотехнический подход к анализу и синтезу состава сложных технических систем, который предполагает вначале рассмотрение сложных динамического комплекса как единого целого, установление цели и задач, возлагаемых на систему, влияния условий окружающей среды. Затем сложная система разбивается на конечное число составляющих ее элементов с четко выраженным их функциональным назначением, для которых определяются статические и динамические характеристики. Анализ статических и динамических свойств может быть успешно произведен только в случае, если достаточно полно известны физические процессы, протекающие в отдельных элементах. После уточнения характера внутренних связей между элементами возможно получить статическую и динамическую характеристики всей сложной технической системы.

В ходе выполнения работы были решены следующие основные задачи:

— произведен анализ возложенных на ЖРДУ задач и уточнены основные внешние воздействия;

— выполнена декомпозиция ЖРДУ до уровня основных агрегатов;

— произведен предварительный расчет ЖРДУ и ее элементов;

— получены статические характеристики (СХ) основных агрегатов и регулировочная характеристика ЖРДУ;

— определены динамические характеристики основных агрегатов двигателя и получена структурная схема ЖРДУ с учетом внутренних связей между элементами;

— составлено уравнение динамики ЖРДУ.

Основной задачей, возложенной на ЖРДУ как объект регулирования, является программное изменение регулируемой величины (например, давления в камере) во времени под действием командного сигнала (изменения положения дросселя регулятора тяги) при воздействии на систему возмущений (например, изменений давлений наддува в баках компонентов) при условии сохранения неизменным заданного соотношения компонентов. В качестве основных элементов ЖРДУ приняты: камера сгорания, форсуночные головки компонентов топлива, тракта охлаждения камеры, магистрали компонентов, дроссель регулятора соотношения компонентов, насосы компонентов, турбина, газогенератор на унитарном топливе, магистраль газогенератора и дроссель регулятора тяги.

Для решения задачи по определению статических характеристик был выбран графоаналитический метод. Применение для анализа графиков позволяет наглядно убедиться в связях отдельных звеньев между собой и хорошо видеть перемещение рабочих точек по характеристикам [1]. Но такой способ обычно не

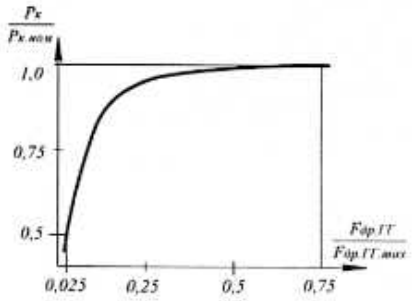


Рис. 1. Регулировочная характеристика ЖРДУ

обеспечивает требуемой точности, поэтому приходится решать эти уравнения аналитически, что, в свою очередь, требует применения современной вычислительной техники, так как большая часть уравнений нелинейна.

Статической характеристикой объекта регулирования (ЖРДУ) будет являться связь выходной величины (давления в камере сгорания $p_к$ или соотношения компонентов топлива в камере $k_т$) с входными величинами, т.е. управляющими воздействиями и внешними возмущениями. Эта характеристика называется еще регулировочной, если она связывает выходную величину — давление в камере с входной командной величиной — положением регулирующего органа. Получение ее необходимо, когда требуется изменение режима работы двигателя в достаточно широких пределах. Для того чтобы изменить тягу P необходимо знать связь между положением регулирующего органа ЖРДУ (или, например, проходной площадью дросселя на магистрали подачи компонента топлива в газогенератор $F_{др.ГГ}$) и величиной, определяющей режим ее работы, т.е. величиной давления в камере. Такую связь и обеспечивает регулировочная характеристика.

В результате расчетов были получены СХ основных агрегатов ЖРДУ, а также регулировочная характеристика самой двигательной установки с насосной системой подачи и автономным топливом для питания турбины, примерный вид которой показан на рис. 1. СХ ЖРДУ могут быть построены и для выявления других связей, например, связи изменения соотношения компонентов топлива в камере с изменением положения дросселя магистрали подачи компонента топлива в газогенератор или изменения давления в камере с воздействием на объект регулирования различных возмущений, как внешних, так и внутренних [2].

Изучению динамических свойств ЖРДУ предшествует изучение динамических свойств ее отдельных составляющих элементов и характера внутренних связей между ними. Динамические характеристики звена связывают изменение выходной величины во времени при определенном законе изменения входной величины. Описание динамических характеристик звена требует применения дифференциальных уравнений, а системы звеньев — системы дифференциальных уравнений.

Основная цель динамического расчета — изучение динамических свойств ЖРДУ как объекта регулирования (ОР), выявление характера изменения регулируемой величины во времени при воздействии на ЖРДУ сигналов со стороны регулятора или внешних возмущений. Динамические характеристики ЖРДУ в целом дают возможность оценить изменения основных регулируемых величин (тяги и соотноше-

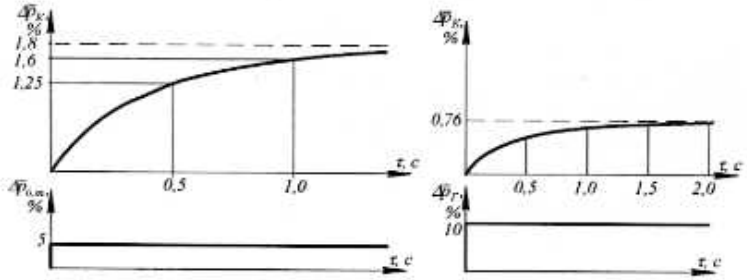


Рис. 2. Возможные виды переходных процессов:
а) от возмущения в баке унитарного топлива; б) от возмущения в баке горючего

ния компонентов топлива) во времени при изменении входных параметров. Основной динамической характеристикой ЖРДУ как ОР является динамическая характеристика прямого канала управления — от точки приложения регулирующего воздействия на объект до регулируемой величины.

Для определения свойств ЖРДУ как объекта регулирования в целом необходимо было найти ее уравнение динамики как элемента САР, т.е. построить ее динамическую модель. При известных динамических свойствах отдельных элементов ЖРДУ задача сводится к совместному решению исходных уравнений динамики всех составляющих ее элементов [3].

Система линеаризованных уравнений динамики, характеризующая движение ОР:

1. Камера сгорания (КС) ЖРДУ:

$$(T_1 p+1)\Delta\bar{p}_к = e^{-\tau p}(K_1\Delta\bar{m}_O + K_2\Delta\bar{m}_Г).$$

2. Форсуночная головка камеры:

$$\Delta\bar{m}_O = K_3\Delta\bar{p}_{ф.O} - K_4\Delta\bar{p}_к;\ \Delta\bar{m}_Г = K_5\Delta\bar{p}_{ф.Г} - K_6\Delta\bar{p}_к.$$

3. Трубопроводы и тракт охлаждения:

$$\Delta\bar{p}_{ф.O} = K_7\Delta\bar{p}_{н.O} - (T_2 p+1)K_8\Delta\bar{m}_O;$$
$$\Delta\bar{p}_{ф.Г} = K_9\Delta\bar{p}_{н.Г} - (T_3 p+1)K_{10}\Delta\bar{m}_Г.$$

4. Напорные характеристики насосов:

$$\Delta\bar{p}_{н.O} = K_{11}\Delta\bar{n} - K_{12}\Delta\bar{m}_O + K_{13}\Delta\bar{p}_O;$$
$$\Delta\bar{p}_{н.Г} = K_{14}\Delta\bar{n} - K_{15}\Delta\bar{m}_Г + K_{16}\Delta\bar{p}_Г.$$

5. Роторная часть турбонасосного агрегата:

$$(T_4 p+1)\Delta\bar{n} = K_{17}\Delta\bar{p}_T - K_{18}\Delta\bar{m}_O - K_{19}\Delta\bar{p}_{н.O} +$$
$$+ K_{20}\Delta\bar{p}_O - K_{21}\Delta\bar{m}_Г - K_{22}\Delta\bar{p}_{н.Г} + K_{23}\Delta\bar{p}_Г.$$

6. Камера разложения газогенератора (ГГ):

$$(T_5 p+1)\Delta\bar{p}_Г = e^{-p\tau_1}\Delta\bar{m}_{ГГ}.$$

7. Форсуночная головка газогенератора с пакетом катализатора

$$\Delta\bar{m}_{ГГ} = K_{24}\Delta\bar{p}_{ф.ГГ} - K_{25}\Delta\bar{p}_Г.$$

8. Управляющий элемент

$$\Delta\bar{p}_{ф.ГГ} = K_{26}\Delta\bar{p}_{Б.Т} - K_{27}\Delta\bar{m}_{ГГ} + K_{28}\Delta\mu\bar{F}_{гр}.$$

Здесь $\Delta\bar{x}$ — безразмерные отклонения величин, $\Delta\bar{x} = \Delta x/x_{ном}$; T_i, K_j — постоянные времени и коэффициенты передачи элементов; $\dot{m}_O$, $\dot{m}_Г$ — расходы окислителя (О) и горючего (Г); $p_{ф.O}$, $p_{ф.Г}$ — давление перед форсунками О и Г; $p_{н.O}$, $p_{н.Г}$ — давление за насосами О и Г; p_O, $p_Г$ — давление на входе в насосы О и Г; n — число оборотов турбонасосного агрегата (ТНА); p_T — полное давление перед турбиной ТНА; $\dot{m}_{ГГ}$ — расход автономного топлива в газогенератор (ГГ); $p_{ф.ГГ}$ — давление перед форсунками ГГ; $p_{Б.Т}$ — давление в баке компонента для питания ГГ (автономного топлива); $\mu F_{гр}$ — площадь дросселя регулятора тяги на магистрали компонента для питания ГГ.

Уравнения динамики элементов ЖРДУ были получены при следующих основных допущениях: жидкость несжимаема, сплошность среды не нарушается, стенки конструкций абсолютно жесткие, параметры магистралей сосредоточенные. Линеаризация исходных уравнений производилась в областях вблизи точек расчетных режимов работы путем разложения в ряд Фурье.

В рассматриваемом ЖРДУ регулируемая величина — давление в КС $\Delta\bar{p}_к$. Основной входной величиной является регулирующее воздействие $\Delta\mu\bar{F}_{гр}$, а возмущающими величинами, действующими на ЖРДУ, будут давления на входе в насосы $\Delta\bar{p}_O$, $\Delta\bar{p}_Г$ и давление в баке компонента для питания ГГ $\Delta\bar{p}_{Б.Т}$. По уравнениям динамики звеньев были составлены структурные схемы отдельных агрегатов, а затем получена структурная схема всей ЖРДУ. Структурная схема дает представление о свойствах каждого из ее элементов и восстанавливает полную картину внутренних связей между ними.

Полученная динамическая модель ЖРДУ позволяет получать возможные виды переходных процессов при приложении на вход регулирующих и возмущающих сигналов с учетом сделанных допущений. При использовании ЭВМ не составляет большого труда проведение вариаций коэффициентами уравнений звеньев при решении задач синтеза необходимого вида переходных процессов и их временных показателей, коррекции характеристик элементов ЖРДУ с целью обеспечения требуемых динамических качеств.

Методика получения динамической характеристики ЖРДУ с насосной системой подачи и автономным топливом для питания турбины была реализована в программном пакете Maple, что позволяет проводить подбор оптимального соотношения параметров двигателя в режиме реального времени, получая наглядные результаты.

В качестве примера приведем два случая переходных процессов для ЖРДУ, являющейся прототипом РД-214, под действием возмущающих сигналов — изменения давление в баке унитарного топлива $\Delta\bar{p}_{б.т}$ (рис. 2а) и изменения давления в баке горючего (изменения давления на входе в насос горючего) $\Delta\bar{p}_г$ (рис. 2б), полагая остальные входные величины равными нулю и отсутствие регулятора. Можно проследить изменение выходной величины $\Delta\bar{p}_к$ во времени, наблюдая характер переходного процесса, установившееся значение выходной величины и временные показатели качества переходного процесса. Хорошо видно, что возмущения в баке унитарного топлива более существенно сказываются на отклонение выходной величины. Информация о переходных процессах может служить для постановки задачи разработки замкнутой САР, например, компенсирующей (устраняющей) переходные процессы, вызванные возмущениями.

Библиографический список

1. Основы теории автоматического управления ракетных двигательных установок / А. И. Бабкин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1986. — 456 с.

2. Яковлев, А.Б. Уравнение динамики двигательной установки / А.Б. Яковлев. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 1999. — 88 с.

3. Яковлев, А.Б. Методика расчета динамической характеристики ЖРДУ / А. Б. Яковлев, Д. А. Дундуков, А. А. Личман // Динамика систем, механизмов и машин : матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. — Омск, 2009. — Кн. 2. — С. 206–211.

ЯКОВЛЕВ Алексей Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиа- и ракетостроение». Адрес для переписки: e-mail: yakovlev@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 21.12.2009 г.

© А. Б. Яковлев

УДК 533.6.011.5 : 621.565.83

А. С. НОСКОВ
А. В. ЛОВЦОВ
А. В. ХАИТ

Уральский государственный технический университет — УПИ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ЗАКРУЧИВАЮЩЕМ АППАРАТЕ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

Проведено математическое моделирование газового потока в закручивающем аппарате вихревой трубы. С целью увеличения энергетических показателей вихревой трубы предложена новая конструкция закручивающего аппарата.

Ключевые слова: вихревая труба, закручивающий аппарат, свободный вихрь.

Во многих современных технических системах встает необходимость применения холодильной техники. Стандартным решением в этой области являются парокомпрессионные холодильные машины. Работа таких аппаратов основывается на теплоэнергетических циклах хладагентов. Типичными представителями данной группы веществ являются фреон и аммиак, обладающие повышенной текучестью. В связи с этим производители холодильных машин устанавливают нормативные значения утечек хладагентов, обычно они составляют около 6 – 8 % в год. В 1980 г. с выяснением того, что отдельные вещества разрушают озоновые слои и влияют на повышение температуры атмосферы земного шара, хладагенты стали объектами ограниченного применения [1].

В качестве одной из возможных альтернатив парокомпрессионным машинам можно рассматривать холодильные установки на базе вихревой трубы. Вихревая труба представляет собой цилиндрическую или коническую трубу, к одному краю которой тангенциально подводится сжатый воздух (рис. 1), вследствие чего в камере энергоразделения формируется свободный вихрь. В образовавшемся вихревом потоке газа возникает эффект энергоразделения Ранка-Хилша, в результате которого центральная часть вихря охлаждается, а периферийная нагревается [2].

Конструкция вихревой трубы является простой, лишенной подвижных частей. Для функционирования вихревой трубы необходимо обеспечить лишь подвод сжатого газа. Необходимое входное давление газа может колебаться от 0,05 до десятков МПа.

Использование вихревых труб позволяет полностью уйти от применения каких-либо хладагентов, а также придает новые качества технологическим системам, такие как быстродействие, мобильность, компактность, предельная простота изготовления и эксплуатации.

В настоящее время одним из немногих недостатков вихревой трубы является ее относительно низкий КПД, не позволяющий в достаточной степени