

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ СУБОРБИТАЛЬНОГО МНОГОРАЗОВОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТУРИСТИЧЕСКОГО КЛАССА

Д.Д. Капитонов

Dan-16@yandex.ru

ГБОУ СОШ № 354, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлена программа, определяющая параметры активного участка траектории многоразового космического аппарата: угол тангажа, угол атаки, высоту полета. Программа позволяет рассчитать перегрузки, воздействующие на многоразовый космический аппарат во время полета на активном участке траектории, а также скорость полета на этом участке. Рассмотрены методы разработки систем обработки данных и основные характеристики предметной области.

Ключевые слова

Многоразовый космический аппарат, траектория полета, угол тангажа, угол атаки, высота полета

Поступила в редакцию 26.06.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

В настоящее время существует множество проектов многоразовых космических аппаратов (МКА), которые различают:

- по назначению (военные, транспортные, туристические);
- виду траектории полета (суборбитальные, орбитальные);
- типу старта (воздушные, наземные),
- типу посадки (парашютные, при помощи ракетного двигателя или планирующего спуска),
- типу носителя (ракета-носитель, самолет-носитель),
- количеству ступеней (одноступенчатые, многоступенчатые, с последовательным расположением ступеней) и т. д.

К наиболее известным и реализованным проектам МКА относятся Space Shuttle (США), Буран (СССР), Dragon (США), DreamChaser (США, аппарат на стадии проведения испытаний). Что касается МКА туристического назначения, то на данный момент наиболее близок к завершению проект SpaceShipTwo (США) [1–5]. Аппараты для осуществления туристических полетов в космос должны обладать следующими характеристиками:

- высоким уровнем надежности при многоразовой и длительной эксплуатации;
- возможностью обеспечить комфорт пассажирам,
- быть экологически чистыми, простыми в эксплуатации и ремонте и др.

В данной работе исследуется крылатый МКА туристического класса (ТК) «Одуванчик», разрабатываемый в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Предполагается, что в носовой части МКА «Одуванчик» будут расположены герметичная вставная кабина объемом около 10 м³ для пилота (один человек) и пассажиров (не более четырех человек), отсеки для бортового оборудования и носовой блок двигате-

лей управления. В средней части расположены системы энергоснабжения и обеспечения температурного режима. В хвостовом отсеке — двигательная установка и топливные баки. Общая компоновочная схема МКА ТК «Одуванчик» представлена на рис. 1, а значение некоторых его характеристик — ниже.

Некоторые характеристики крылатого МКА

Название характеристики	Значение
Количество пассажиров и вес, кг	5/600
Вес аппарата, кг	3500
Размах крыла, мм	8,25
Площадь крыла, м ²	33
Длина фюзеляжа, м	9,4

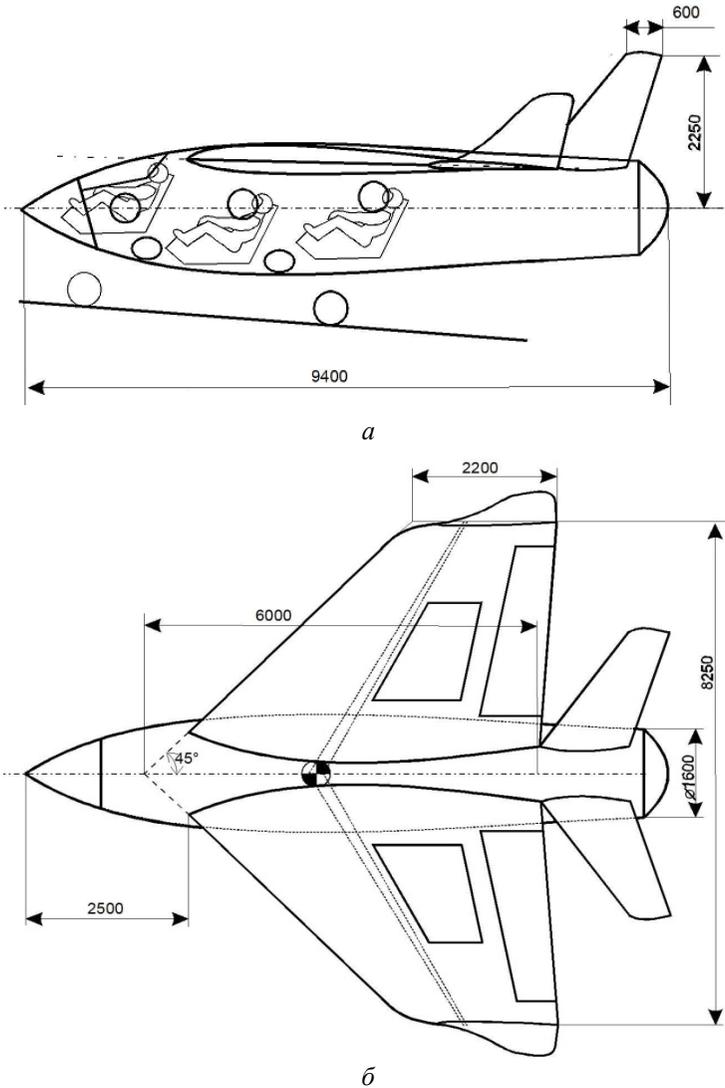


Рис. 1. Общая компоновочная схема суборбитального МКА ТК «Одуванчик» и его основные параметры: вид сбоку (а) и сверху (б)

Небольшие размеры МКА «Одуванчик» позволяют осуществлять его доставку к месту старта наземным транспортом. Его запуск планируется осуществлять при помощи одноступенчатого ракетного ускорителя. Расчетная высота, на которую поднимается «Одуванчик», составляет 120 км при массе груза 600 кг.

Во время полета на активном участке траектории на МКА ТК действует система сил, изображенная на рис. 2.

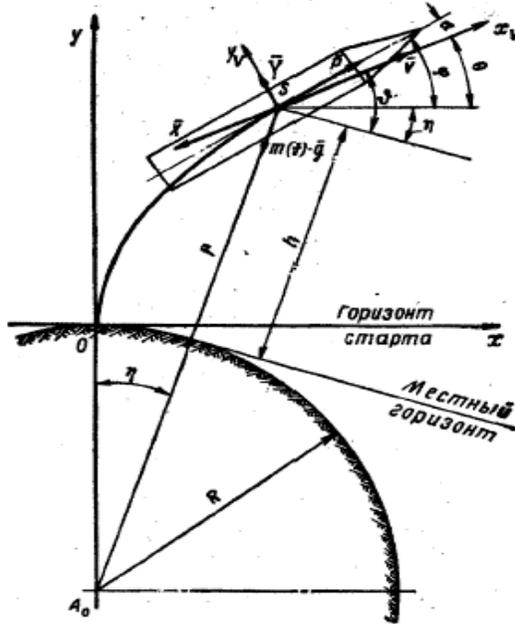


Рис. 2. Силы, действующие на МКА на активном участке траектории

Для моделирования параметров траектории используют систему уравнений движения на активном участке траектории в проекциях на оси земной системы координат:

$$m(t) \frac{dV_x}{dt} = P(h) \cos \varphi - X(V, h, \alpha) \cos \theta - Y(V, h, \alpha) \sin \theta - m(t) g \sin \eta;$$

$$m(t) \frac{dV_y}{dt} = P(h) \sin \varphi - X(V, h, \alpha) \sin \theta - Y(V, h, \alpha) \cos \theta - m(t) g \cos \eta;$$

$$\frac{dx}{dt} = V_x;$$

$$\frac{dy}{dt} = V_y;$$

$$V^2 = V_x^2;$$

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2;$$

$$r^2 = x^2 + (R + y)^2;$$

$$H = r - R;$$

$$\eta = \arctg\left(\frac{x}{R+y}\right);$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{V_x}{V}\right);$$

$$\alpha = \varphi - \theta;$$

$$\varphi = \varphi_{\text{пр}}(t),$$

где $m(t)$ — текущее значение массы ракеты; $P(h)$ — суммарная тяга двигателей, направленная по продольной оси ракеты; X, Y — соответственно сила лобового сопротивления и подъемная сила ракеты; g — текущее значение ускорения силы притяжения Земли; φ — угол тангажа, измеренный между продольной осью ракеты и горизонтом старта; $\varphi_{\text{пр}}(t)$ — программное значение угла тангажа; α — угол атаки; h — высота ракеты над поверхностью Земли; θ — угол наклона вектора скорости к горизонту старта; η — полярный угол.

Сила лобового сопротивления X и подъемная сила Y зависят от плотности воздуха, скорости полета, характерной площади и аэродинамического сопротивления:

$$X = C_x \frac{\rho V_x^2}{2} S;$$

$$Y = C_y \frac{\rho V_y^2}{2} S,$$

где C_x — безразмерный аэродинамический коэффициент сопротивления; ρ — плотность воздуха; V_x, V_y — проекции вектора скорости на координатные оси X и Y соответственно; S — характерная площадь.

Плотность воздуха уменьшается по мере набора высоты (табл. 1, рис. 3) и определяется в соответствии с ГОСТ 4401-81 «Атмосфера стандартная. Параметры».

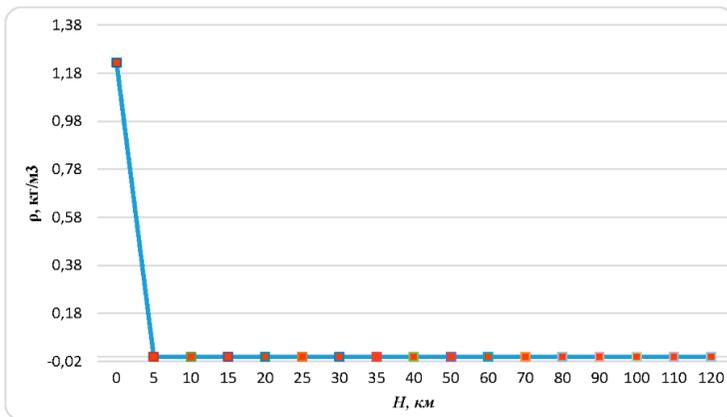


Рис. 3. Зависимость плотности воздуха ρ от высоты H

**Основные параметры атмосферы для высот
от 0 до 120 км согласно ГОСТ 4401-81**

Высота над уровнем моря H , км	Температура за бортом T , К	Атмосферное давление p , Па	Плотность воздуха ρ , кг/м ³
0	288,15	$1,01325 \times 10^5$	$1,22500 \text{E}+00$
5	255,65	$5,40199 \times 10^4$	$7,36116 \times 10^{-1}$
10	223,15	$2,64362 \times 10^4$	$4,12706 \times 10^{-1}$
15	216,65	$1,06170 \times 10^4$	$1,70719 \times 10^{-1}$
20	216,65	$5,47487 \times 10^3$	$8,80346 \times 10^{-2}$
25	221,65	$2,51101 \times 10^3$	$3,94657 \times 10^{-2}$
30	226,65	$11,7186 \times 10^2$	$1,80119 \times 10^{-2}$
35	237,05	$5,58920 \times 10^2$	$8,21387 \times 10^{-3}$
40	251,05	$2,77520 \times 10^2$	$3,85099 \times 10^{-3}$
50	270,65	75,9445	$9,77522 \times 10^{-4}$
60	245,45	20,3141	$2,88319 \times 10^{-4}$
70	217,45	4,63418	$7,42423 \times 10^{-5}$
80	196,65	0,88627	$1,57004 \times 10^{-5}$
90	186,65	0,18314	$3,41817 \times 10^{-6}$
100	196,60	0,31860	$5,54951 \times 10^{-7}$
110	255,487	0,007359	$9,34035 \times 10^{-8}$
120	334,420	0,002666	$2,44041 \times 10^{-8}$

Исходные данные для расчетов параметров траектории МКА ТК приведены ниже:

- 1) M_0 — стартовая масса, $M_0 = 10000$ кг;
- 2) $I_{удп}$ — удельный импульс, $I_{удп} = 3200$ м/с;
- 3) $P_{удп}$ — тяга двигателя, $P_{удп} = \frac{I_{удп}}{g} = 326,3$ с;
- 4) m — расход топлива за одну секунду, $m = 46,8$ кг/с;
- 5) $\mu = m_i/M_0 = 0,505$;
- 6) λ — тяговооруженность, $\lambda = M_0/P_{удп} = 0,667$;
- 7) r — радиус-вектор;
- 8) R — средний радиус земного шара, $R = 6371$ км.

Методы обработки данных. Большое внимание в работе было уделено структурам данных, под которыми понимается совокупность правил и ограничений, отражающих связи между отдельными частями данных.

В результате исследований выявлено, что при проектировании программы целесообразнее создавать модель представления данных, которая не зависит от реализации, используя при этом абстрактные структуры данных. Модель представления данных может быть как простой, так и комбинированной, то есть включающей различные абстрактные структуры. Ниже приведены описания основных структур данных.

Множество — это неупорядоченная совокупность взаимно независимых (несвязанных) элементов. Используется, если необходимо определять принадлежность какого-либо элемента множеству аналогичных элементов.

Структуры данных с неявными, то есть статическими связями элементов, называют таблицами. Это множество элементов, с каждым из которых связан ключ. Используют их обычно для хранения данных. Основная операция — поиск информации по ключу. Различают четыре типа таблиц с разной эффективностью поиска данных:

- просмотровые;
- прямого доступа;
- двоичного поиска;
- смешанные.

В просмотровых таблицах записи излагаются последовательно. Их недостатком является длительное среднее время поиска. К достоинствам относят простоту создания и добавления данных.

В таблицах прямого доступа ключ однозначно определяет адрес. Чаще всего ключом является натуральное число, или ключ привязан к натуральному числу — номеру элемента. В таких таблицах ключ можно не хранить. Однако подобная структура редко применима, так как ключи часто бывают непоследовательными или изменяются в недопустимо больших диапазонах. Достоинство таблиц прямого доступа является быстрый поиск. К ним относят:

1) массив — множество элементов, расположенных таким образом, что упорядоченное множество целых чисел (ключ) однозначно определяет позицию каждого элемента, а также обеспечивает возможность организации прямого доступа к каждому элементу. Если упорядоченное множество содержит N чисел, то массив N -мерный. Числа, входящие в упорядоченное множество, называют индексами. Каждый индекс имеет свой диапазон изменения;

2) строка — одномерный массив символов.

3) запись — конечное упорядоченное множество элементов, в общем случае различных типов. Ключом является порядковый номер поля или его имя.

Логический порядок элементов в просмотровых таблицах и таблицах прямого доступа при реализации обычно совпадает с физическим порядком расположения элементов. Элементами являются записи фиксированной, переменной и неопределенной длины. В зависимости от типа записи, таблицы реализуются массивом записей или массивом векторов (статических или динамических), в котором основной массив содержит адреса векторов записей.

Для массива записей фиксированной длины адреса промежуточных записей задаются формулой:

$$A_i = A_1 + (i - 1)l,$$

где A_i — адрес i -й записи; A_1 — адрес первой записи; l — длина записи.

Достоинством такого типа таблиц считают экономное использование памяти, так как записи располагаются одна за другой без промежутков, недо-

статками — необходимость заранее знать общее число записей, их длину и диапазон изменения ключей.

В структурах с явными связями каждый элемент содержит указатели на следующие элементы (связи представлены в явном виде). В основном используют при моделировании данных с изменяемыми связями между элементами, так как несут в явном виде информацию о связях. Особенностью данного вида данных, является то, что доступ к элементу осуществляется последовательно.

Также заслуживают внимания древовидные структуры с явными связями, в которых записи располагаются по уровням следующим образом. На первом уровне расположена только одна запись (корень дерева); любая запись i -го уровня связана (адресуется) только с одной записью ($i - 1$)-го уровня.

В настоящей работе принято решение использовать структуры данных с неявными связями. Долговременно целесообразно хранить данные в файле в виде множества записей, а в оперативной памяти в виде массива записей.

Методам обработки данных также уделено внимание. В частности, методам, связанным с операциями поиска, сортировки и корректировки.

Метод упорядочения обменом. Данный метод базируется на попарном сравнении соседних элементов: первый элемент сравнивается со вторым и, если он больше/меньше, то элементы меняются местами. Далее второй элемент сравнивается с третьим и т. д. После анализа последнего элемента процесс повторяется сначала.

Метод на основе поиска минимального/максимального элемента, заключается в следующем. Определяется минимальный/максимальный элемент всего набора и осуществляется обмен с первым элементом. Затем определяется наименьший/наибольший элемент из оставшегося набора и меняется местами со вторым и т. д.

Метод вставки. Элемент массива a_i , начиная со второго, сравнивается последовательно с предшествующими a_j , где $j = i - 1, i - 2, \dots$ до тех пор, пока не будет найден элемент с меньшим значением, чем a_i . Пусть этот элемент с номером j , где $j < i$, тогда все элементы с номерами $j + 1, \dots, i - 1$ сдвигаются на одну позицию, а i -й элемент ставится на место $(j + 1)$ -го элемента. Если все стоящие впереди элементы больше i -го, то они сдвигаются на одну позицию, а i -й элемент ставится на первое место.

Метод Шелла состоит в том, что упорядочиваемый массив делится на ряд групп, каждая из которых упорядочивается методом вставки, а затем массивы объединяются.

В разрабатываемой системе было принято решение использовать метод обменной сортировки (метод упорядочения обменом).

Особое внимание заслуживают методы поиска. Поиском называют процедуру выделения из множества записей подмножества, элементы которого удовлетворяют заранее поставленному условию. Поисковым признаком может служить номер записи в массиве или значение ключа. Условия поиска могут быть различными: по совпадению, по попаданию в интервал, по удовлетворению арифметическому условию, по удовлетворению семантическому условию

или несколькими условиями. Если задано только одно значение признака поиска, то такой поиск называют единичным, если же задано множество признаков поиска — групповым. Эффективность различных алгоритмов поиска оценивают по количеству сравнений пар признаков, необходимых для выполнения условия поиска.

В методе последовательного поиска записи просматриваются по порядку с целью отыскания тех, для которых значение ключевого признака совпадает со значением признака поиска. Метод является универсальным в том смысле, что применим как к упорядоченным, так и к неупорядоченным массивам данных.

При выборе метода двоичного поиска используют деление массива на части. Метод деления на две части называют двоичным (дихотомическим) поиском. Пусть массив упорядочен и длина его известна. На первом шаге сравнивается значение ключевого признака средней записи p_i . Если $p_i = q$, то после проверки соседних элементов (они могут иметь то же значение ключевого признака) поиск прекращается. Если $p_i > q$, то дальнейший поиск будет осуществляться в первой половине массива. Если $p_i < q$, то поиск будет продолжаться во второй половине массива. Затем в выделенном подмассиве определяется средняя запись и производится сравнение p_i и q . Двоичным его называют в связи с тем, что после каждого сравнения принимается одно из двух альтернативных решений.

Метод вычисления адреса применяется к упорядоченным массивам, если значения ключевых признаков не повторяются и их число не превышает числа записей в массиве. При этом записи в массиве должны быть фиксированной длины. Номера записей и числовые значения ключевых признаков связаны между собой адресной функцией.

При гнездовом способе организации множество элементов разбивают на группы по определенному принципу, затем эти группы объединяют в гнезда с одинаковой структурой. Далее строят дополнительную структуру, в которой все элементы взаимодействуют друг с другом. Каждый элемент содержит ключевой признак и адрес только одного гнезда. К недостаткам данного метода относят дополнительный расход памяти.

В результате исследований было принято решение использовать последовательный метод поиска, а среди методов разработки программных продуктов — спиральную схему. В соответствии с данной схемой программное обеспечение создается не сразу, а итерационно с использованием метода, базирующегося на создании прототипов. На первой итерации, как правило, специфицируют, проектируют, реализуют и тестируют интерфейс. На второй — добавляют некоторый ограниченный набор функций. На последующих этапах этот набор расширяют, наращивая возможности данного продукта. Данную технологию поддерживают современные системы программирования VisualC++, Delphi и др.

В итоге выбран язык Pascal, а среда разработки — Delphi 7. Данное средство является визуальным и поддерживает как процедурный, так и объектный подход к программированию.

Определение структуры системы и разработка функциональной схемы. Во время проектирования была разработана функциональная схема программы, которая представлена на рис. 4.

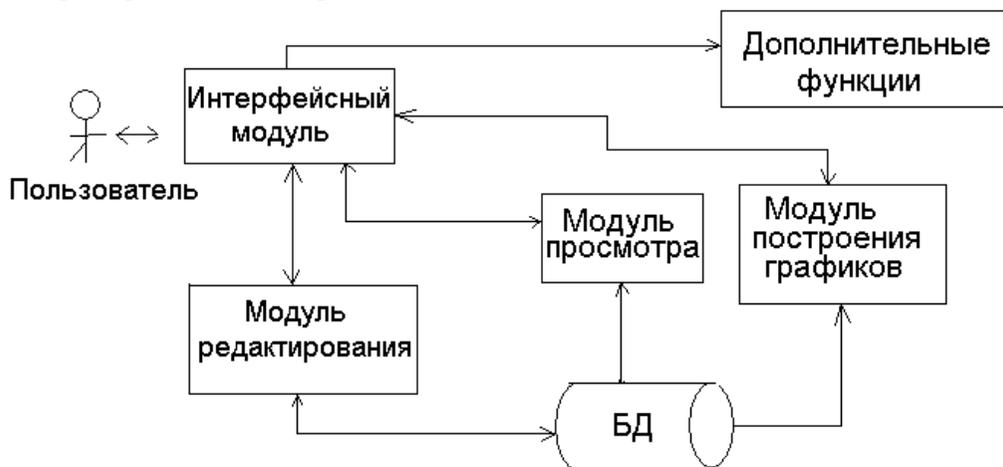


Рис. 4. Предложенная функциональная схема программы

В базе данных (БД) представлены основные параметры траектории МКА. Для редактирования данной базы используется модуль редактирования, при работе с которым предоставляется дополнительный сервис (ввод, редактирование, расчет и др.). Модуль просмотра позволяет пользователю увидеть содержимое базы данных. Интерфейсный модуль предназначен для организации диалога между пользователем и системой. Модуль построения графиков позволяет строить зависимости данных, хранящихся в базе. Дополнительные функции — предоставляют пользователю дополнительные возможности (калькулятор и др.).

Разработка интерфейса пользователя. При проектировании интерфейса с пользователем необходимо выбрать форму диалога. В результате проведенных исследований выявлено, что в настоящее время используют следующие основные формы диалога:

1) директивная. Данная форма характеризуется тем, что при вызове исполнения операции применяется директива (команда). Инициатором обмена является пользователь, возможности выбора операций не ограничены, интерпретация запроса однозначная и выполняется автоматически. Словарь состоит из ключевых слов на естественном языке, сокращений, чисел и мнемокодов. Основное достоинство такой формы диалога — это большая гибкость. Основной недостаток — требует повышенной квалификации пользователя.

2) табличная. Включает в себя конкретные типы:

- выбор операции для исполнения по меню, которое представляет собой перечень фраз на естественном языке;
- заполнение и редактирование шаблона данных (совокупность фиксированных полей кадра). Различают шаблон-вектор и шаблон-таблицу;
- комбинирование меню и шаблонов в одном кадре.

К достоинствам табличной формы диалога относят простоту обучения, к недостаткам — меньшую оперативность и гибкость, по сравнению с директивной формой;

3) фразовая. Ограниченно использует естественный язык. Инициатором шага может быть как пользователь, так и система. Основные достоинства — это более свободное общение с программой и ориентированность на пользователя, не владеющего специальными знаниями, недостатки — большие временные и трудозатраты, отсутствие гарантии однозначности формулировок.

Для разработки программы определения траекторных параметров МКА выбрана табличная форма построения диалога. Обусловлено это тем, что в настоящее время для данной формы диалога в инструментальных средствах предусмотрен большой набор готовых интерфейсных элементов и система программирования Delphi не является исключением.

Тестирование системы. Тестированием называют процесс выполнения программы с целью обнаружения ошибки. Никакое тестирование не может доказать отсутствие ошибок в программе.

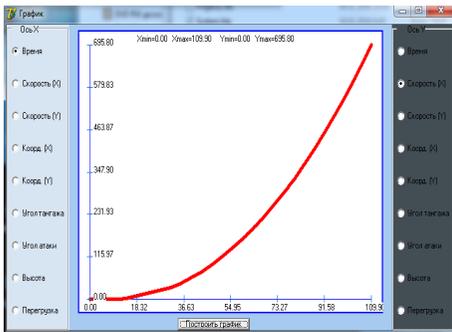
Тестирование программы, разработанной в рамках данной работы, проводилось не только автором, также проверялись действия программы на основе неверных данных.

В ходе тестирования использовали просмотр за столом, который относят к методам ручного контроля, предназначенным для периода разработки, когда программа закодирована и тестирование на машине еще не началось. Эти методы способствуют существенному увеличению производительности и повышению надежности программ и с их помощью можно обнаружить от 30 до 70 % ошибок. Основными методами ручного тестирования являются:

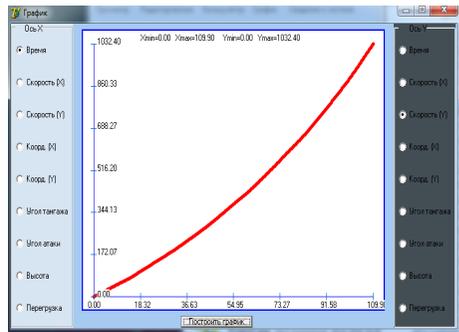
- инспекции исходного текста;
- сквозные просмотры;
- просмотры за столом;
- обзоры программ.

Существуют и другие методы тестирования, например, по принципу «белого ящика», «черного ящика» и оценочное тестирование. Стратегия тестирования по принципу «белого ящика», позволяет проверить внутреннюю структуру программы. Стратегия «черного ящика» позволяет с помощью тестов осуществить выполнение программы по всем возможным маршрутам передач управления. Оценочное тестирование позволяет проверить программу в целом, например, на предельных объемах, на различных конфигурациях и т. д. В настоящей работе в основном использовали метод структурного контроля и метод эквивалентных разбиений.

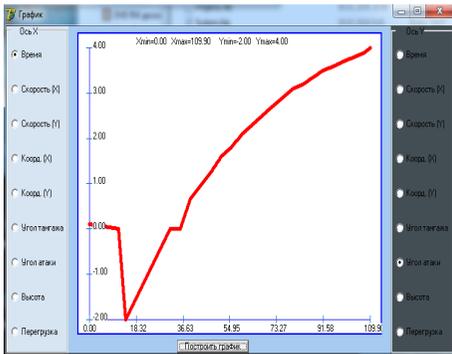
Обработка полученных результатов. При использовании предложенной программы были получены зависимости скорости полета (рис. 5 а, б), угла атаки (рис. 5, в), угла тангажа (рис. 5, г), высоты полета (рис. 5, д) и перегрузки от времени полета на рассматриваемом активном участке траектории полета.



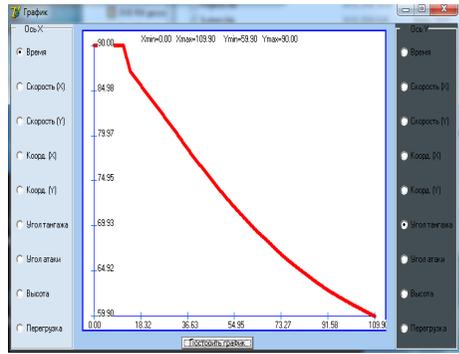
a



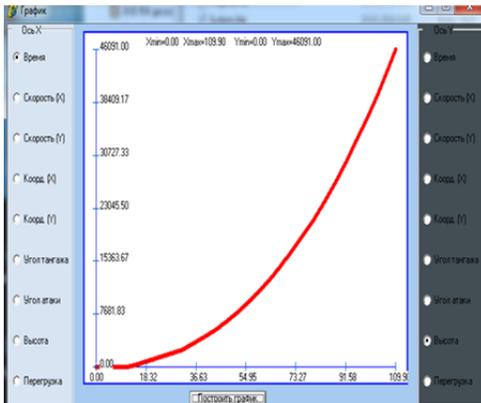
б



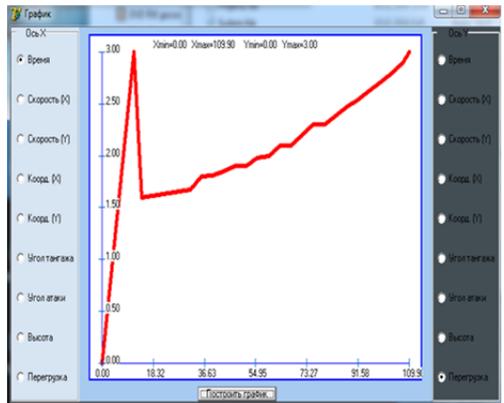
в



г



д



е

Рис. 5. Результаты исследований (скриншоты):

зависимости скорости полета по оси X (*a*); скорости полета по оси Y (*б*); угла атаки (*в*); угла тангажа (*г*); высоты полета (*д*); возникающей перегрузки (*е*) от времени полета

Выводы. В результате проделанной работы была создана программа, которая определяет такие параметры активного участка траектории МКА, как угол тангажа, угол атаки и значение высоты полета. Кроме того, разработанная программа позволяет определить перегрузки, воздействующие на МКА во время

полета на активном участке траектории, а также скорость полета на данном участке.

В дальнейшем с целью развития предложенной системы планируется улучшить интерфейс, ввести возможность перерасчёта данных по формулам, визуализировать процесс полёта.

Работа выполнена в рамках Всероссийской олимпиады школьников «Шаг в будущее. Космонавтика».

Литература

- [1] Агеева Т.Г., Дудар Э.Н., Резник С.В. Комплексная методика проектирования конструкции крыла многоразового космического аппарата. *Авиакосмическая техника и технология*, 2010, № 10, с. 3–8.
- [2] *Turbo Pascal 7.0*. URL: <http://mif.vspu.ru/books/pascal/> (дата обращения 01.07.2017).
- [3] Иванова Г.С. *Технология программирования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 242 с.
- [4] Иванова Г.С., Ничушкина Т.Н., Пугачев Е.К. *Объектно-ориентированное программирование*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 320 с.
- [5] Федоров Ф.Г. *Delphi для всех*. Москва, КомпьютерПресс, 1998, 543 с.

Капитонов Даниил Дмитриевич — учащийся ГБОУ среднеобразовательной школы № 354, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Е.К. Пугачёв, канд. техн. наук, доцент кафедры «Компьютерные системы и сети», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

DEVELOPING THE PARAMETERS DETERMINATION PROGRAM FOR DEFINING THE TRAJECTORY OF THE SUB-ORBITAL RE-ENTRY SPACE VEHICLE OF THE TOURIST CLASS

D.D. Kapitonov

Dan-16@yandex.ru

State Budget Educational Institution Secondary School № 354, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article introduces a program defining the parameters of the re-entry space vehicle active trajectory: the pitch angle, the angle of attack, the flight altitude. The program allows calculating the g-loads affecting the re-entry space vehicle during the flight along the active trajectory as well as the flight velocity in this leg. We consider the methods of designing the data processing systems and the key features of the domain area.

Keywords

Re-entry space vehicle, flight trajectory, pitch angle, angle of attack, flight altitude

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Ageeva T.G., Dudar E.N., Reznik S.V. Complex method of wing structure engineering for reusable orbital carrier. *Aviakosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace technology], no. 10, 2010, pp. 3–8.
- [2] Turbo Pascal 7.0. Available at: <http://mif.vspu.ru/books/pascal/> (accessed 01 July 2017).
- [3] Ivanova G.S. *Tekhnologiya programmirovaniya* [Programming technology]. Moscow, Bauman Press, 2002, 242 p.
- [4] Ivanova G.S., Nichushkina T.N., Pugachev E.K. *Ob'ektno-orientirovannoe programmirovaniye* [Object-oriented programming]. Moscow, Bauman Press, 2001, 320 p.
- [5] Fedorov F.G. *Delphi dlya vsehkh* [Delphi for everyone]. Moscow, Komp'yuterPress publ., 1998, 543 p.

Kapitonov D.D. — student, State Budget Educational Institution Secondary School № 354, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Pugachev E.K., Cand Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Computer Systems, Complexes and Networks Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.