ГБОУ Гимназия №1505

«Московская городская педагогическая гимназия-лаборатория»

**Дипломная работа**

**Измерение зависимости силы тяги от времени на примере ракеты, работающей на сжатом воздухе**

*автор*: ученик 10 класса «А»

Вакульчик Егор

*Руководитель:Наумов А.Л.*.

#

#

#

#

#  Содержание

Введение………………………………………………………………………………………3

Глава 1………………………………………………………………………………………...4

Глава 2……...…………………………………………………………………………………9

Заключение………………………………………………………………………………….18

Список литературы…………………………………………………………………………19

#

#

#

#

# ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена измерению зависимости измерения силы тяги от времени .. Основной целью работы будет рассмотрение нескольких программных моделей ракет . Помимо указанного будет рассмотрена теория, а именно: реактивное движение, закон сохранения импульса, так как, без понимания основных законов физики, лежащих в основе реактивного движения, изучение механики движения ракет невозможно.

Эта тема актуальна, так как в связи с нарастающей популярностью построения собственных ракет, а также тематике программирования реальных объектов.

Целью моей работы является построение нескольких моделей ракет, а также сравнение их между собой.

Таким образом, настоящая работа будет разбита на 2 главы.

Глава 1, содержит теоретические основы реактивного движения, в ней будет рассмотрено понятие “импульс” и закон сохранения импульса.

Глава 2, содержит модели ракет, построенных на сжатом воздухе, а также их сравнении.

Простой уровень изложения материала, а также возрастающий интерес к самой тематике ракетостроения, позволяет предположить, что данная работа может быть интересна широкому кругу читателей.

# Глава 1

В данной главе я опишу что такое импульс, рассмотрю его виды, расскажу как они связаны с ракетами. В заключении объясню, почему летят ракеты.

Для того, чтобы объяснить, что такое импульс потребуется расписать Второй Закон Ньютона.

## 1.1 Понятие импульс, импульс материальной точки

Второй закон Ньютона

 $ma=F$ (1), где:

|  |  |
| --- | --- |
| $m$-масса тела | $F$-сила |
| $a$-ускорение тела |  |

можно записать в иной форме. Это нужно для того, чтобы объяснить,что такое импульс материальной точки.

Если на тело (материальную точку) действует постоянная сила, то постоянным является и ускорение

$a=(v\_{к}-v\_{н})/Δt$(2), где:

|  |  |
| --- | --- |
| $v\_{к}$-конечная скорость тела | $Δt$-изменение времени |
| $v\_{н}$-начальная скорость тела |  |

Значения $v\_{н}\_{}$ и $v\_{к}$- начальное и конечное значение скорости соответственно.Заменив значение ускорения из формулы 1, и подставив её в формулу 2, получим:

 $m\*(v\_{к}-v\_{н})\*Δt=F$ (3).

Преобразовав формулу 3, получим:

$ m\*v\_{к}−m\*v\_{н}=F\*Δt$(4).

Появляется новая физическая величина — импульс материальной точки.

Импульс материальной точки величину равная произведению массы точки на ее скорость.Импульс обозначается буквой $p$ и вычисляется по формуле 5

 $p=mv$(5).

Импульс — векторная величина, это значит, что он имеет то же направление, что и скорость.Единица импульса не имеет названия;она характеризуется в кг/м/c.

Другая форма записи второго закона Ньютона

“Обозначим через *p*1=*mυ*1 импульс материальной точки в начальный момент интервала Δ*t*, а через *p*2=*mυ*2 — импульс в конечный момент этого интервала. Тогда *p*⃗ 2−*p*⃗ 1=Δ*p* есть *изменение импульса* за время Δ*t*. Теперь уравнение (3) можно записать так:

$Δp=F\*Δt$(6), где

$Δp$-изменение импульса

Так как Δ*t* > 0, то направления векторов Δ*p* и *F* совпадают.

Изменение импульса материальной точки пропорционально приложенной к ней силе и имеет такое же направление, как и сила.

Произведение силы на время ее действия называют импульсом силы. Не надо путать импульс *mυ*⃗ материальной точки и импульс силы *F*Δ*t* .Это совершенно разные величины.”

## 1.2 Закон сохранения импульса

Для того, чтобы в дальнейшем разобраться в моем реферате понадобится понятие Закона сохранения импульса.

Закон сохранения импульса*:* если сумма внешних сил, действующих на тела системы, равна нулю, то импульс системы сохраняется*.*

Тела могут только обмениваться импульсами, но суммарное значение импульса не изменяется. Надо только помнить, что сохраняется векторная сумма импульсов, а не сумма их модулей. Если бы сохранялась модульная сумма, то сумма импульсов в системе не была бы равна нулю.

Система тел, на которую не действуют внешние силы, называется замкнутой или изолированной. В замкнутой системе тел импульс сохраняется., Заметим, что все системы, существующие в природе не являются замкнутыми, так как на них, например,непременно действует сила трения непременно присутствует. Но в теоретической физике(когда рассматривают ЗСИ) принято считать, что на тела не действует сила трения

## 1.3 Реактивное движение. Уравнение Мещерского. Реактивная сила

Для этой части реферата понадобятся несколько понятий:

1.Сопло-канал, позволяющий направить жидкость или газ по определенному направлению и придания ему определенной скорости.

2.Результирующая сила - сила, полученная в результате сложения других сил.

Реактивное движение- движение возникающее при отделении от тела его частей.Оно возникает,например, при истечении продуктов сгорания из сопла реактивного летательного аппарата.

Главная особенность реактивной силы состоит в том, что она возникает без какого-либо взаимодействия с внешними телами. Происходит лишь взаимодействие между ракетой и вытекающей из нее струей вещества.

Это значит, что ракете для того чтобы двигаться не нужна поверхность для движения, например, асфальт, который необходим машинам.

При истечении продуктов сгорания топлива они за счет давления в камере сгорания приобретают некоторую скорость и, следовательно, некоторый импульс. Поэтому в соответствии с законом сохранения импульса сама ракета получает такой же по модулю импульс, но направленный в противоположную сторону.

Масса ракеты с течением времени убывает. Ракета в полете является телом переменной массы. Для расчета ее движения удобно применить закон сохранения импульса.

Формула Циолковского позволяет определить скорость, которую развил летательные аппарат, если бы на него не действовали внешние силы, например, сила притяжения планет. Такая скорость называется характеристической: Характеристическая скорость-скорость ракеты носителя или космического аппарата, которую приобрели бы ракета-носитель или космический аппарат, при отсутствии других сил. Данная формула является одной из основных в реактивном движении.

$V=I\*ln(\frac{M\_{1}}{М\_{2}})$(7), где:

|  |  |
| --- | --- |
| *V*— конечная (после выработки всего топлива) скорость летательного аппарата; | *I*— удельный импульс ракетного двигателя (отношение тяги двигателя к секундному расходу массы топлива); |
| $М\_{1}$— начальная масса летательного аппарата (полезная нагрузка + конструкция аппарата + топливо); | $М\_{2}$— конечная масса летательного аппарата (полезная нагрузка + конструкция). |
| ln-десятичный логарифм от отношения масс |  |

Логарифм- показатель степени x , в которую нужно возвести c, чтобы получить N .

Уравнение Мещерского — основное уравнение в механике тел переменной массы(тела, которые с течением времени меняют свою массу).Уравнение обычно записывается в следующем виде

 $M(t)\frac{ΔV}{Δt}=u\_{1}(t)\frac{Δm\_{1}}{Δt}-u\_{2}(t)\frac{Δm\_{2}}{Δt}+F\_{}$(8),где:

|  |  |
| --- | --- |
| $M(t)$— масса материальной точки, изменяющаяся за счет обмена частицами с окружающей средой, в произвольный момент времени t; | $V$— скорость движения;$u\_{1}(t)=V\_{1}-V$— относительная скорость присоединяющихся частиц; |
| $F$— результирующая внешних сил; | $V$— скорость движения; |
| $u\_{2}(t)=V\_{2}-V$— относительная скорость отделяющихся частиц; | $\frac{Δm\_{1}}{Δt}>0;\frac{Δm\_{2}}{Δt}>0$— скорость изменения массы; |
| $\frac{ΔV}{Δt}$— ускорение |  |

# ГЛАВА 2

Вторая глава посвящена созданию действующей модели ракеты на сжатом воздухе. В

этой главе мы проанализируем результаты эксперимента, которые мы получили при исследовании зависимости силы тяги от времени. Также, мы исследуем несколько цифровых моделей и сравним результаты, полученные в ходе исследований.

## 2.1 Реальная модель ракеты

Для того, чтобы исследовать зависимость силы тяги от времени, нам потребовалось создать модель ракеты, работающей на сжатом воздухе, провести ряд экспериментов и воссоздать зависимость графически

## 2.1.1 Описание конструкции

Первым шагом в исследовании силы тяги ракеты на сжатом воздухе было построение конструкции, которая состоит из 3 частей:

* Пусковой установки, состоящей из трубы ПВХ(1), насадки от гардены(2)(для возможности состыковки с ракетой), одностороннего клапана(данный клапан нужен, чтобы при накачке воздуха, он не имел возможности вернуться обратно)(3) и нипеля от велосипедной камеры(4), для возможности присоединения насоса(5). Данная установка нужна для нагнетания воздуха в ракету.(Рисунок 1)
* Направляющей конструкции, состоящей из 4 алюминиевых балок(1), соединённых посредством 2 предметов кубической формы, роль которых выполнили кубики рубика(2). К одному из них, с помощью изоленты, был прикреплен электронный динамометр(3), подсоединённый к компьютеру. Эта конструкция нужна чтобы закрепить динамометр, а также-для направления ракеты в петлю динамометра.
* Непосредственно ракеты, в качестве которой выступила бутылка(1) с коннектором(2) от гардины накрученным на горлышко бутылки.(Рисунок 3)

## 2.1.2 Описание экспериментов

Мы хотели исследовать зависимость силы тяги, создаваемой ракетой, от времени. Для этого нам понадобился динамометр, который мерил силу тяги и стенд, описание которого вы можете прочитать выше. В бутылку объёмом 0,5л заливалось 0,1л воды. Далее, бутылка устанавливалась в пусковую установку. С помощью велосипедного насоса производились 20 качков, чтобы давление, нагнетённое в бутылку выталкивало топливо, во время полёта, наружу. Расчёт давления-сложна техническая задача, потому что установка монометра внутрь ракеты не представлялось нам технически возможным. Поэтому мы решили посчитать его теоретически.

$ pv=νRT$(1)

C помощью уравнения Менделеева-Клапейрона можно вычислить, какое давление передаётся в бутылку за один качок.

$ p=νRT/v$(2)

Подставив величины, получим, что давление внутри ракеты равно $p=3,4\*10^{5}$

Затем, ракета устанавливалась в направляющую конструкцию, где в последствии, запускалась в направлении датчика.В качестве датчика выступил электронный динамометр для фиксации изменения силы со временем.

## 2.1.3 Результаты экспериментов

Для выделения тенденции было проведено 8 серий экспериментов, описанных выше. Так как всё топливо вылетает из ракеты за 0,06 с (согласно литературе[[1]](#footnote-0)), ниже приведены данные зависимости силы тяги от времени:

|  |
| --- |
| Таблица 1 |
| Время,С | 1 серия | 2 серия | 3 серия | 4 серия | 5 серия | 6 серия | 7 серия | 8 серия |
| 0 | 51,40 | 52,84 | 50,24 | 45,42 | 49,54 | 44,13 | 50,91 | 49,15 |
| 0,005 | 27,54 | 19,56 | 43,84 | 19,14 | 30,39 | 36,78 | 29,19 | 30,91 |
| 0,01 | 23,46 | 16,86 | 16,36 | 9,19 | 16,93 | 22,48 | 24,73 | 21,99 |
| 0,015 | 22,65 | 22,09 | 11,06 | 16,54 | 18,93 | 15,56 | 19,35 | 16,15 |
| 0,02 | 19,10 | 22,27 | 13,20 | 24,16 | 19,67 | 14,36 | 18,79 | 15,77 |
| 0,025 | 15,70 | 22,93 | 20,58 | 21,21 | 17,10 | 16,82 | 20,79 | 14,89 |
| 0,03 | 16,89 | 16,01 | 17,42 | 21,28 | 19,49 | 15,94 | 20,90 | 15,66 |
| 0,035 | 17,63 | 13,38 | 13,90 | 19,98 | 17,03 | 15,41 | 17,84 | 15,03 |
| 0,04 | 17,14 | 19,03 | 13,17 | 19,35 | 16,08 | 14,96 | 15,27 | 14,11 |
| 0,045 | 15,87 | 17,38 | 13,80 | 19,53 | 16,01 | 14,08 | 14,22 | 12,22 |
| 0,05 | 13,45 | 15,77 | 13,97 | 18,58 | 17,45 | 12,88 | 14,71 | 11,87 |
| 0,055 | 13,13 | 14,96 | 13,73 | 18,16 | 17,14 | 12,36 | 15,94 | 10,49 |
| 0,06 | 13,27 | 13,52 | 12,43 | 17,14 | 15,56 | 11,62 | 15,20 | 10,00 |

Для исключения случайных ошибок, уберём максимальное и минимальное значение силы тяги за определённый момент времени и посчитаем среднее. Получим следующую таблицу:

|  |
| --- |
| Таблица 2 |
| Время,с | Среднее значение силы, Н | Случайная погрешность | Стандартное отклонение |
| 0 | 49,42 | 4,34 | 2,98 |
| 0,005 | 28,80 | 12,35 | 8,20 |
| 0,01 | 20,23 | 7,77 | 5,15 |
| 0,015 | 17,94 | 5,80 | 3,79 |
| 0,02 | 18,06 | 5,48 | 3,80 |
| 0,025 | 19,02 | 4,02 | 3,00 |
| 0,03 | 17,43 | 2,81 | 2,29 |
| 0,035 | 15,96 | 3,30 | 2,23 |
| 0,04 | 16,10 | 3,09 | 2,23 |
| 0,045 | 15,07 | 3,66 | 2,31 |
| 0,05 | 14,16 | 3,56 | 2,30 |
| 0,055 | 14,02 | 3,57 | 2,56 |
| 0,06 | 13,21 | 7,20 | 2,31 |



Спарава, мы видим график зависимости силы тяги от времени. Исходя из диаграммы видно, что максимальное значение силы тяги~49 н. Видна тенденция, при которой есть резкий спад в силе, длящийся 0,01 с. За оставшееся время спад силы незначителен.

## 2.2 Программная модель ракеты

Получив реальные данные, мы хотели проверить их теоретически. Для этого, мы построили модель, основанную на теоретических формулах.

Для вычисления силы тяги, мы можем воспользоваться следующей формулой:

$T=m\_{w}\*u\_{e}$(4), где

|  |  |
| --- | --- |
| $m\_{w}$-массовый расход топлива | $T$-сила тяги ракеты |
| $u\_{e}$-$скорость истечения топлива$ |  |

Массовый расход топлива, в свою очередь, можно рассчитать по формуле:

$m\_{w}=ρ\_{w}\*u\_{e}\*S\_{0}$(5), где

|  |  |
| --- | --- |
| $ρ\_{w}$-плотность топлива | $S\_{0}$-площадь узкой части сопла |

При подставлении формулы 5 в формулу 4, получим следующую формулу для силы тяги:

 $T=ρ\_{w}\*u\_{e}^{2}\*S\_{0}$(6)

По этой формуле мы и можем считать силу тяги для нашей модели.

При помощи этой формулы, мы постараемся найти другую формулу, которая свяжет силу тяги со временем.

Чтобы найти скорость истечения топлива, нам нужно воспользоваться одним из частных случаев закона Бернулли, который выглядит следующим образом:

$Δp=ρ\*u\_{e}^{2}/2$(3),где

|  |  |
| --- | --- |
| $Δp$-разность между давлением внутри ракеты и атмосферным | $u\_{e}^{}-скорость истечения топлива$ |
| $ρ$-плотность топлива(в нашем случае-воды) |  |

При плотности воды, равной 1000 $кг/м^{3}$ и уже вычисленной разности давлений, мы можем вычислить стартовую скорость истечения жидкости.

Так как нам уже известна как плотность воды и площадь узкой части сопла(9 миллиметров), при подставлении этих значений в формулу для силы тяги, мы получим первое значение для силы.

Для того, чтобы получить зависимость силы тяги от времени, нам потребуется узнать некоторые параметры газа в бутылке. Для начала, нам нужно будет посчитать, сколько топлива вытекло за единицу времени. Для этого нужно воспользоваться следующей формулой:

$Q=μ\*S\_{0}\*\sqrt{2\*Δp/ρ}$(7), где

|  |  |
| --- | --- |
| $Q$-объёмный расход топлива | $μ$-коэффициент расхода |

Далее-необходимо посчитать, на сколько изменился объём воды в ракете за единицу времени. Для того, чтобы максимально приблизить виртуальную модель к реальной, единицей времени служит 0,005 с, так как это-величина, с которой(раз в которую) динамометр измерял силу тяги ракеты.

$ΔV=Q\*Δt(8)$, где

|  |  |
| --- | --- |
| $ΔV$-изменение объёма газа внутри ракеты | $Δt$-изменение времени |

Соответственно, объём после вылета жидкости за $Δt $будет равен

 $V=V\_{0}+ΔV\*Δt(6)$,где

|  |  |
| --- | --- |
| $V\_{}$-конечный объём газа в ракете | $V\_{0}$- начальный объём газа в ракете |

Процесс увеличения объема газа, во время истечения топлива из ракеты, является адиабатным, так как он происходит очень быстро.

$ p\*V^{K}=const$(9)

Формулу для адиабатного процесса можно расписать следующим образом:

 $p\_{1}\*V\_{1}^{K}=p\_{2}\*V\_{2}^{K}$(10), где:

|  |  |
| --- | --- |
| $p\_{1}$-начальное давление газа | $p\_{2}$-конечное давление газа |
| $V\_{1}$-начальный объём газа | $V\_{2}$-конечный объём газа |
| $K$-показатель адиабаты, равный 1,4 для воздуха |  |

После написания всех формул, мы можем написать программу, которая будет за каждый шаг изменять величину объёма, величину, на которую увеличился объём.

После того, как мы прошли все шаги, описанные выше, мы можем найти зависимость между силой тяги и временем и сравнить их с результатами, полученными в ходе экспериментов.

|  |
| --- |
| Таблица 3 |
| Время,с | Сила тяги,Н | Время,с | Сила тяги,Н |
| 0 | 30,52 | 0,035 | 25,42 |
| 0,005 | 29,69 | 0,04 | 24,81 |
| 0,01 | 28,90 | 0,045 | 24,22 |
| 0,015 | 28,14 | 0,05 | 23,66 |
| 0,02 | 27,42 | 0,055 | 23,11 |
| 0,025 | 26,73 | 0,06 | 22,59 |
| 0,03 | 26,06 |  |  |

Справа, мы видим 2 графика в одной оси координат: график синего цвета-тренд реальной модели, а красная показывает тренд нашей модели. На диаграмме видно, что основной спад силы тяги длится всего 0,01 секунды, в то время как в цифровой модели сила тяги убывает равномерно и спада, как такового, нет. также стоит отметить, что после спада графики идут параллельно, что означает, что наша модель не совпадает с реальной только в первые 0,01

В процессе исследования, мы также изучали цифровые модели, созданные другими людьми. Мы воспользовались одной из самых популярных моделей в Интернете.

Так , на сайте <http://polyplex.org/> была найдена ещё одна модель. Чтобы посчитать тягу, вам необходимо внести значения, характерные для данной ракеты вашей ракеты.

|  |
| --- |
| Таблица 4 |
| Объём ракеты | 0,5 л | Коэф. потери  | 0,3 |
| Объём воды в ракете | 0,1 л | Диаметр бутылки | 60 мм |
| Давление | $3,4\*10^{5}$Па | Масса нетто | 15 г |
| Размер сопла | 9 мм | Начальная скорость | 0 $\frac{м}{с}$ |

Затем, программа предоставит вам несколько графиков. Одним из них будет, нужный нам, график зависимости силы тяги от времени. После подсчёта точек с графика, получим следующую таблицу:

|  |
| --- |
| Таблица 5 |
| Время, с | Сила, Н | Время, с | Сила, Н |
| 0 | 34,3 | 0,03 | 30,5 |
| 0,005 | 33,8  | 0,035 | 30 |
| 0,01 | 33 | 0,04 | 28,5 |
| 0,015 | 32,4 | 0,045 | 28 |
| 0,02 | 31,8 | 0,05 | 27,8 |
| 0,025 | 31 | 0,055 | 26,8 |
|  |  | 0,06 | 26,2 |



На графике, приведённом выше, к предыдущим значениям силы реальной модели и цифровой, добавились значения модели с сайта, отмеченные оранжевым цветом. Как мы видим, практически идентичны, а несовпадение графиков является следствием несовпадения начальной тяги. В свою очередь, процесс, происходящий в этой модели также проходит медленнее, чем в реальной модели. В целом, программные модели ведут себя одинаково, в отличие от реальной.

#

#

#

# Заключение

В данной исследовательской работе, мы хотели изучить зависимость силы тяги ракеты, работающей на сжатом воздухе, от времени и познакомить вас с результатами, работающими на сжатом воздухе. Для этого мы построили реальную модель ракеты и провели необходимые измерения на её основе. Также, мы проанализировали две цифровых модели и сравнили результаты с поведением реальной ракеты .

Так, мы получили, что цифровые модели в большей степени совпадают между собой, а именно: модели ведут себя идентично, за исключением начальной силы тяги. В то же самое время, процесс в реальной модели проходит гораздо быстрее, чем в обеих моделях: мы можем увидеть резкий спад в силе тяги, длящийся 0,01 секунды, которого нет в цифровых версиях. Тем не менее, в оставшиеся 0,05 с, процесс совпадает с тем, что предсказывали обе модели.

 Таким образом, можно сделать вывод, что модели лишь частично могут описать реальное поведение ракеты. Возможно дело в том, что исследование проводилось на стенде, и если бы датчики были установлены на реальной ракете, ее поведение более бы соответствовало математической модели. Так же, можно предположить, что были еще какие-то процессы, которые были нами не учтены, но которые привели к такому резкому падению тяги.

#

#

Список литературы

1) Иностранные

1. “Physics 1 for dummies”, Steven Holzner, PhD, Wiley Publishing, Inc-2011-384 c.
2. “Physics-Principle and problems”, Zitzewitz, Elliot, Haase, McGrawHill, Chicago- 941 c.
3. National physical laboratory Teddington-A guide to building and understanding the physics of Water Rockets-2007[Электронный Ресурс]-<http://www.npl.co.uk/upload/pdf/wr_booklet_print.pdf>(Дата обращения-01.05.2015)

2) Русские

1. Е.Е Цеплин-Краткий справочник по физике: учеб. пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. – 65 с.
1. National physical laboratory Teddington-A guide to building and understanding the physics of Water Rockets[Электронный ресурс-<http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/systems/Lab_Notes/>(Дата Обращения-1.05.2015) [↑](#footnote-ref-0)