

Краевой конкурс учебно-исследовательских и проектных работ учащихся
«Прикладные вопросы математики»

Прикладные вопросы математики

Тепловые машины. Реактивные двигатели

Аппазова Екатерина Сергеевна,
Казанцева Алёна Вячеславовна,
МОУ «Лицей №1» г. Перми, 9 кл.
Гольдштейн Инна Григорьевна,
преподаватель физики
МОУ «Лицей №1» г. Перми

Введение.

Прогресс человечества теснейшим образом связан с развитием энергетики. Овладение новым источником энергии, открытие новых путей её преобразования и использования - это обычно целая эпоха в истории материальной культуры. Одним из достижений человечества оказалась тепловая машина.

Тепловая машина — устройство, преобразующее тепловую энергию в механическую работу (тепловой двигатель) или механическую работу в тепло (холодильник). Преобразование осуществляется за счёт изменения внутренней энергии рабочего тела — на практике обычно пара или газа.

Существуют два типа тепловых машин: нециклические тепловые машины и циклические тепловые машины. Рассмотрим принцип действия машин второго типа. В основе теоретического обоснования тепловых машин лежит второй закон термодинамики, который утверждает: невозможно создать циклически работающий тепловой двигатель, единственным результатом действия которого получения от источника количества теплоты и превращение его полностью в механическую энергию. Чтобы тепловая машина могла циклически работать, она обязательно должна включать:

- Нагреватель.
- Холодильник.
- Рабочее тело.

Принцип работы такой машины состоит в следующем: рабочее тело, находясь в контакте с нагревателем, получает от него в результате теплообмена количество теплоты Q_1 , нагреваясь до температуры T_1 . Затем контакт прерывается, и рабочее тело переходит в контакт с холодильником. В процессе перехода рабочее тело совершает механическую работу.

Придя в контакт с холодильником, оно отдаёт ему некоторое количество теплоты Q_2 и охлаждается. Затем рабочее тело переходит в контакт с нагревателем и процесс повторяется.

Все тепловые машины, независимо от их конструкции, по своему назначению делятся на два типа: **тепловые двигатели** и **холодильные установки**.

Тепловые двигатели, независимо от их конструктивных особенностей, решают одну и ту же задачу – превращение внутренней энергии в механическую.

Холодильные установки служат для того, чтобы, отбирая некоторое количество теплоты от холодного тела, например, морозильной камеры, поддерживать в ней низкую температуру.

В свою очередь тепловые двигатели делятся на: паровую турбину, двигатель внутреннего сгорания, газовую турбину и реактивный двигатель. Рассмотрим ближе реактивный двигатель. В современной авиации гражданской и военной, в космической технике широкое применение получили реактивные двигатели, в основу создания которых положен принцип получения тяги за счёт силы реакции, возникающей при отбросе от двигателя некоторой массы

(рабочего тела), а направление тяги и движения отбрасываемого рабочего тела противоположны. При этом величина тяги пропорциональна произведению массы рабочего тела на скорость её отброса. Так упрощённо можно описать работу реактивного двигателя, а настоящая научная теория современных реактивных двигателей разрабатывалась несколько десятков лет. И в её основе и конструкции реактивных двигателей лежат труды русских учёных и изобретателей, которые в развитии реактивных двигателей и вообще в ракетной техники всегда занимали ведущее место.

Реактивный двигатель — двигатель-движитель, создающий необходимую для движения силу тяги посредством преобразования потенциальной энергии топлива в кинетическую энергию реактивной струи рабочего тела.

История реактивного двигателя

Первооткрывателем идеи реактивного движения надо считать Герона, жившего за 150 лет до нашей эры. Он построил металлический шар с двумя выступающими трубками, выхлопные отверстия которых были направлены в противоположные стороны. После наполнения водой шар подогревался. Через некоторое время вода закипала, и шар начинал вращаться под реактивным действием струи пара, выходящего через трубки. Самый первый проект, который можно считать пра-прототипом газовой турбины, датируется 1791г. Его автором был Джон Барбер. В 1863г. во Франции появился проект аппарата, названного своим автором, Жаном Делувриером, членом Академии наук в Париже, «аэронефом». Передвигаться он должен был с помощью реактивного «мотора», а активным агентом служил водяной пар. Следующий изобретатель реактивной турбины происходил из Швеции - Патрик де Лаваль. На его идеи впоследствии опирались французы, братья Армэнго (Armengaud), которые около 1900г. построили в Париже подобную турбину. Первым конструктором, который смог контролировать процесс сгорания в камере своей турбины, а, следовательно - и ее тягу, был немец - Ганс Хольцварт. Его устройство имело несколько клапанов, позволяющих регулировать давление внутри камеры сгорания.

Физические основы работы реактивного двигателя.

В основе современных мощных реактивных двигателей различных типов лежит принцип прямой реакции, т.е. принцип создания движущей силы (или тяги) в виде реакции (отдачи) струи вытекающего из двигателя "рабочего вещества", обычно - раскалённых газов. Во всех двигателях существует два процесса преобразования энергии. Сначала химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию продуктов сгорания, а затем тепловая энергия используется для совершения механической работы. К таким двигателям относятся поршневые двигатели автомобилей, тепловозов, паровые и газовые турбины электростанций и т.д.

Рассмотрим этот процесс применительно к реактивным двигателям. Начнем с камеры сгорания двигателя, в котором тем или иным способом, зависящим от типа двигателя и рода топлива, уже создана горючая смесь. Это может быть, например, смесь воздуха с керосином, как в турбореактивном

двигателе современного реактивного самолёта, или же смесь жидкого кислорода со спиртом, как в некоторых жидкостных ракетных двигателях, или, наконец, какое-нибудь твёрдое топливо пороховых ракет. Горючая смесь может сгорать, т.е. вступать в химическую реакцию с бурным выделением энергии в виде тепла. Способность выделять энергию при химической реакции, и есть потенциальная химическая энергия молекул смеси. Химическая энергия молекул связана с особенностями их строения, точнее, строения их электронных оболочек, т.е. того электронного облака, которое окружает ядра атомов, составляющих молекулу. В результате химической реакции, при которой одни молекулы разрушаются, а другие возникают, происходит, естественно, перестройка электронных оболочек. В этой перестройке - источник выделяющейся химической энергии. Видно, что топливами реактивных двигателей могут служить лишь такие вещества, которые при химической реакции в двигателе (сгорании) выделяют достаточно много тепла, а также образуют при этом большое количество газов. Все эти процессы происходят в камере сгорания, но остановимся на реакции не на молекулярном уровне (это уже рассмотрели выше), а на "фазах" работы. Пока сгорание не началось, смесь обладает большим запасом потенциальной химической энергии. Но вот пламя охватило смесь, ещё мгновение - и химическая реакция закончена. Теперь уже вместо молекул горючей смеси камеру заполняют молекулы продуктов горения, более плотно "упакованные". Избыток энергии связи, представляющей собой химическую энергию прошедшей реакции сгорания, выделился. Обладающие этой избыточной энергией молекулы почти мгновенно передали её другим молекулам и атомам в результате частых столкновений с ними. Все молекулы и атомы в камере сгорания стали беспорядочно, хаотично двигаться со значительно более высокой скоростью, температура газов возросла. Так произошел переход потенциальной химической энергии топлива в тепловую энергию продуктов сгорания.

Подобный переход осуществлялся и во всех других тепловых двигателях, но реактивные двигатели принципиально отличаются от них в отношении дальнейшей судьбы раскалённых продуктов сгорания. После того, как в тепловом двигателе образовались горячие газы, заключающие в себя большую тепловую энергию, эта энергия должна быть преобразована в механическую. Ведь двигатели для того и служат, чтобы совершать механическую работу, что-то "двигать", приводить в действие. Чтобы тепловая энергия газов перешла в механическую, их объём должен возрасти. При таком расширении газы и совершают работу, на которую затрачивается их внутренняя и тепловая энергия.

Расширяются газы, конечно, и в реактивном двигателе, ведь без этого они не совершают работы. Но работа расширения в том случае не затрачивается на вращение вала, связанного с приводным механизмом, как в других тепловых двигателях. Назначение реактивного двигателя иное - создавать реактивную тягу, а для этого необходимо, чтобы из двигателя вытекала наружу с большой скоростью струя газов - продуктов сгорания: сила реакции этой струи и есть тяга двигателя. Следовательно, работа расширения газообразных продуктов сгорания топлива в двигателе должна быть затрачена на разгон самих же газов.

Это значит, что тепловая энергия газов в реактивном двигателе должна быть преобразована в их кинетическую энергию - беспорядочное хаотическое тепловое движение молекул должно замениться организованным их течением в одном, общем для всех направлении.

Для этой цели служит одна из важнейших частей двигателя, так называемое реактивное сопло. К какому бы типу не принадлежал тот или иной реактивный двигатель, он обязательно снабжен соплом, через которое из двигателя наружу с огромной скоростью вытекают раскалённые газы - продукты сгорания топлива в двигателе. В одних двигателях газы попадают в сопло сразу же после камеры сгорания, например, в ракетных или прямоточных двигателях. В других, турбореактивных, - газы сначала проходят через турбину, которой отдают часть своей тепловой энергии. Она расходуется в этом случае для приведения в движение компрессора, служащего для сжатия воздуха перед камерой сгорания. Но, так или иначе, сопло является последней частью двигателя - через него текут газы, перед тем как покинуть двигатель.

Реактивное сопло может иметь различные формы, и, тем более, разную конструкцию в зависимости от типа двигателя. Главное заключается в той скорости, с которой газы вытекают из двигателя. Если эта скорость истечения не превосходит скорости, с которой в вытекающих газах распространяются звуковые волны, то сопло представляет собой простой цилиндрический или суживающий отрезок трубы. Если же скорость истечения должна превосходить скорость звука, то соплу придается форма расширяющейся трубы или же сначала суживающейся, а затем расширяющейся (сопло Лавля). Только в трубе такой формы, как показывает теория и опыт, можно разогнать газ до сверхзвуковых скоростей, перешагнуть через "звуковой барьер".



Классы реактивных двигателей

Воздушно-реактивный двигатель — [реактивный двигатель](#), развивающий тягу за счёт реактивной струи рабочего тела, истекающего из [сопла](#) двигателя. С этой точки зрения ВРД подобен [ракетному двигателю](#) (РД), но отличается от последнего тем, что большую часть рабочего тела он забирает из окружающей

среды — атмосферы, в том числе и окислитель, необходимый для горения топлива. В качестве окислителя в ВРД используется кислород, содержащийся в воздухе. Благодаря этому **ВРД обладает преимуществом в сравнении с ракетным двигателем при полётах в атмосфере**: если летательный аппарат, оборудованный ракетным двигателем должен транспортировать как горючее, так и окислитель, масса которого больше массы горючего в 2-8 раз, в зависимости от вида горючего, то аппарат, оснащённый ВРД должен иметь на борту только запас горючего. Следовательно, при одной и той же массе топлива аппарат с ВРД энергетически в несколько раз более обеспечен, чем аппарат с ракетным двигателем, и на активном участке полёта может преодолеть в несколько раз большее расстояние (иногда — в десятки раз).

Ракетные двигатели

Ракетные двигатели — реактивный двигатель, источник энергии и рабочее тело которого находится в самом средстве передвижения. Ракетный двигатель — единственный практически освоенный для вывода полезной нагрузки на орбиту искусственного спутника Земли и применения в условиях безвоздушного космического пространства тип двигателя. Другие типы двигателей, пригодные для применения в космосе (например, солнечный парус, космический лифт) пока еще не вышли из стадии теоретической и/или экспериментальной отработки. Сила тяги в ракетном двигателе возникает в результате преобразования исходной энергии в кинетическую энергию реактивной струи рабочего тела.

Характеристикой эффективности ракетного двигателя является удельный импульс (в двигателестроении применяют несколько другую характеристику — удельная тяга) — отношение количества движения, получаемого ракетным двигателем, к массовому расходу рабочего тела. Удельный импульс имеет размерность м/с, то есть размерность скорости. Для идеального ракетного двигателя удельный импульс численно равен скорости истечения рабочего тела из сопла.

Химический ракетный двигатель.

Наиболее распространены химические ракетные двигатели, в которых, в результате экзотермической химической реакции горючего и окислителя (вместе именуемые топливом), продукты сгорания нагреваются в камере сгорания до высоких температур, расширяясь, разгоняются в сверхзвуковом сопле и истекают из двигателя. Топливо химического ракетного двигателя является источником, как тепловой энергии, так и газообразного рабочего тела, при расширении которого его внутренняя энергия преобразуется в кинетическую энергию реактивной струи.

В твердотопливном двигателе (РДТТ) горючее и окислитель хранятся в форме смеси твёрдых веществ, а топливная ёмкость одновременно выполняет функции камеры сгорания.

В жидкостных ракетных двигателях (ЖРД) горючее и окислитель пребывают в жидком агрегатном состоянии. Они подаются в камеру сгорания с помощью турбонасосной или вытеснительной системами подачи. Жидкостные

ракетные двигатели допускают регулирование тяги в широких пределах, и многократное включение и выключение, что особенно важно при маневрировании в космическом пространстве.

Создание модели ракеты. Расчет и оптимизация тяги двигателя

На основании выше изложенного, мы изготовили модель ракеты, применив химический твёрдотопливный реактивный двигатель. Модель мы сделали из утеплителя труб, который изготавливается из пенополиэтилена. Данный материал имеет маленькую плотность, что позволит нам изготовить ракету небольшой массы, а это в свою очередь увеличит дальность полёта ракеты.

Для изготовления корпуса воспользуемся трубчатым пенополиэтиленом с внутренним диаметром 15 мм, наружным 25 мм. Длину берём 200 мм. Внутренне отверстие нам понадобится для размещения реактивного двигателя. Делаем обтекатель на верхнюю часть ракеты, чтобы уменьшить сопротивление воздуха при полёте. Так же делаем три стабилизатора, для того чтобы предать устойчивость ракете при полёте. Приклеиваем собранные части.

Реактивный двигатель мы взяли от петарды. Аккуратно достали основной заряд из верхней части петарды, оставив только реактивный двигатель. Наружный диаметр двигателя 15 мм, его размещаем в нижней части ракеты.

В связи с тем, что наш корпус получился гибким, прикрепим скотчем два стабилизатора, сделанных из деревянных брусков 4x4 мм. Так же мы используем их как направляющие при старте. Масса сконструированной нами ракеты составила 12 г. Масса двигателя около 6 г и масса порохового заряда около 4 г.

Разработка проекта действующей модели ракеты тесно связана с вопросом о двигателе. Какой двигатель лучше поставит на модель? Какие из его характеристик являются главными? В чем их сущность? Разобраться в этих вопросах моделисту необходимо. Ясное представление о значении тяги двигателя, времени его работы, суммарном и удельном импульсе и их влиянии на качество полета модели ракеты поможет правильно выбрать двигатель для модели ракеты.

Основными характеристиками ракетного двигателя являются:

1. Тяга двигателя	P (кг)
2. Время работы	t (сек)
3. Удельная тяга	$P_{уд}$ (кг х сек/кг)
4. Суммарный импульс	J_{Σ} (10 н х сек=1 кг×сек)
5. Вес топлива	G_t (кг)
6. Секундный расход топлива	ω (кг)
7. Скорость истечения газов	W (м/сек)
8. Вес двигателя	$G_{дв}$ (кг)
9. Размеры двигателя	l, d (мм)

Рассмотрим схему возникновения тяги в ракетном двигателе. В процессе работы двигателя в камере сгорания непрерывно образуются газы, являющиеся продуктами сгорания топлива. Допустим, что камера, в которой находятся под давлением газы, представляет собой замкнутый сосуд (рис 11,а), тогда легко понять, что никакой тяги в этой камере возникнуть не может, так как давление

распределяется одинаково по всей внутренней поверхности замкнутого сосуда и все силы давления взаимно уравновешены.

В случае же закрытого сопла (рис 11,б) газы, находящиеся в камере сгорания под давлением, устремляются с большой скоростью через сопло. При этом часть камеры, которая находится против отверстия сопла, тоже неуравновешенна, в результате чего и возникает тяга.

Если рассматривать только поступательное движение газов вдоль камеры сгорания и сопла, то распределение скорости газов на этом пути можно охарактеризовать кривой (рис 12,а). Давление на элементы поверхности камеры и сопла распределяются так, как показано на рис 12,б.

Величина нескомпенсированной площади дна камеры сгорания равна площади наименьшего сечения сопла. Очевидно, чем больше площадь этого сечения, тем больше количество газов сможет покинуть камеру сгорания в единицу времени.

Таким образом, можно сделать вывод: тяга двигателя зависит от количества газов, покидающих камеру сгорания в единицу времени в результате нескомпенсированной площади и скорости течения газов, обусловленной неуравновешенностью давлений.

Для получения количественной зависимости рассмотрим изменение количества движения газов при их истечении из камеры сгорания. Допустим, что в течение времени t камеру сгорания двигателя покидает некоторое количество газа, массу которого обозначим m . Если предположить, что поступательная скорость газов в камере сгорания равна нулю, а на выходе из сопла достигает значения W м/сек, то изменение скорости газа будет равно W м/сек. В этом случае изменение количества движения упомянутой массы газа запишется в виде равенства:

$$\Delta Q = mW \quad (1)$$

Однако изменение количества движения газов может произойти только в том случае, если на газ будет действовать некоторая сила P на протяжении некоторого времени t , тогда

$$\Delta Q = J_{\Sigma} \quad (2)$$

где $J_{\Sigma} = P \times t$ – импульс силы, действующий на газ.

Заменив в формуле (1) значение ΔQ на равное $J_{\Sigma} = P \times t$, получим:

$$P \times t = m \times W \quad (3)$$

Отсюда

$$P = m/t \times W \quad (4)$$

Мы получили выражение силы, с которой стенки камеры сгорания и сопла действуют на газ, вызывая изменение его скорости от 0 до W м/сек.

В соответствии с законами механики сила, с которой стенки камеры и сопла действуют на газ, равна по величине силе P , с которой в свою очередь газ действует на стенки камеры и сопла. Эта сила P и есть тяга двигателя.

$$P = m/t \times W \quad (5)$$

Известно, что масса любого тела связана с его весом (в данном случае с весом топлива двигателе) соотношением:

$$m = G_t/g \quad (6)$$

где G_T – вес топлива; g – ускорение силы земного тяготения.

Подставив в формулу (5) вместо массы газа m ее аналогичное значение из формулы (6), получим:

$$P = G_T / g t \times W \quad (7)$$

Величина G_T / t представляет собой весовое количество топлива(газа), покидающего камеру сгорания двигателя за единицу времени (1сек). Эту величину называют весовым секундным расходом и обозначают ω . Тогда

$$P = \omega / g \times W \quad (8)$$

Итак, мы вывели формулу тяги двигателя. Необходимо заметить, что такой вид формула может иметь лишь в том случае, когда давление газа в момент прохождения его через выходной срез сопла равно окружающему давлению. В противном случае в правую часть формулы добавляется ещё один член:

$$f(p_k - p_o) \quad (9)$$

где f – площадь выходного сечения сопла (см^2); p_k – давление газа в выходном сечении сопла ($\text{кг}/\text{см}^2$); p_o – окружающее (атмосферное) давление ($\text{кг}/\text{см}^2$).

Таким образом, окончательно формула тяги ракетного двигателя имеет вид:

$$P = \omega / g \times W + f(p_k - p_o) \quad (10)$$

Первый член правой части $\omega / g \times W$ носит название динамической составляющей тяги, а второй $f(p_k - p_o)$ – статической составляющей. Последняя составляет около 15% от общей тяги, поэтому для простоты изложения в расчет приниматься не будет.

Для расчета тяги можно использовать формулу, имеющую аналогичное значение с формулой (5), при $P = \text{const}$:

$$P_{\text{ср}} = J_{\Sigma} / t \quad (11)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя тяга двигателя (кг); J_{Σ} - суммарный импульс двигателя ($\text{кг} \times \text{сек}$); t – время действия двигателя (сек).

При постоянном значении тяги часто используется формула

$$P = P_{\text{уд}} \times \rho \times U \times F \quad (12)$$

где $P_{\text{уд}}$ – удельная тяга двигателя ($\text{кг} \times \text{сек} / \text{кг}$); ρ – удельный вес топлива ($\text{г} / \text{см}^3$); U – скорость горения топлива ($\text{см} / \text{сек}$); F – площадь горения (см^2); P – тяга двигателя (кг).

В случаях непостоянной тяги, например при определении начальной, максимальной, средней тяги и тяги в любой момент времени действия двигателя, в эту формулу необходимо вводить истинные значения U и F данного двигателя.

Итак, тяга является произведением эффективной скорости истечения газов W на массовый секунднй расход топлива ω / g .

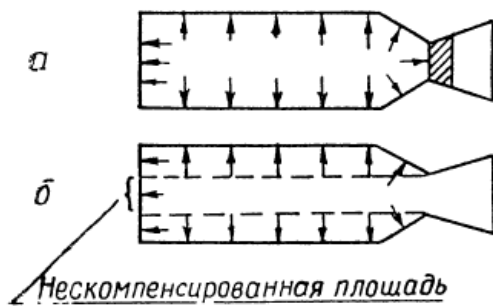


Рис. 11. Схема образования реактивной тяги в ракетном двигателе

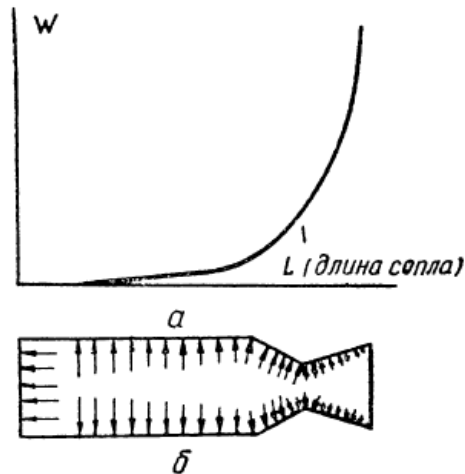


Рис. 12. Схема изменения скорости истечения газов в камере сгорания

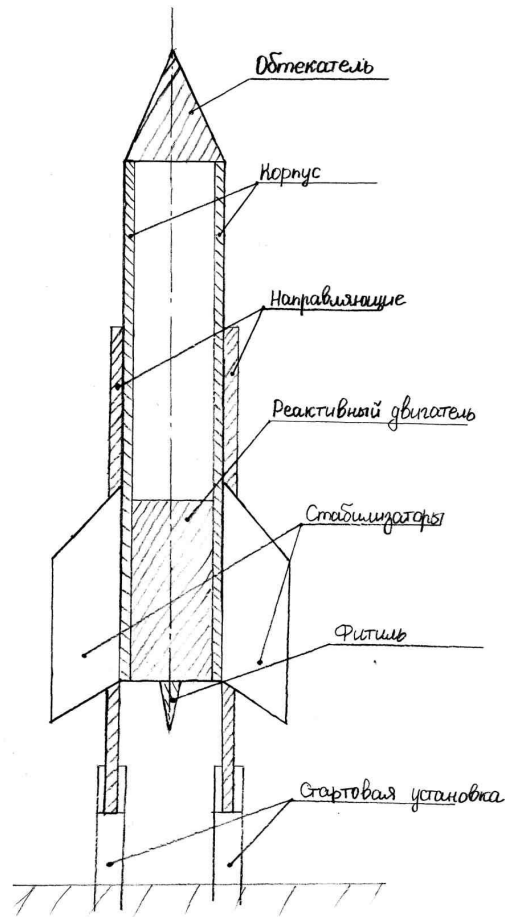
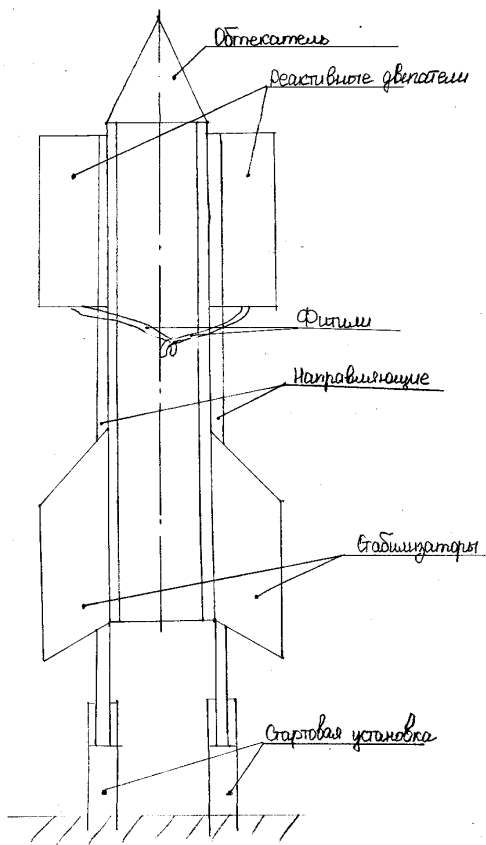
Мы не сможем рассчитать полностью характеристики реактивного двигателя, так как нам неизвестны параметры топлива, которые заложены в петарду, а так же время горения топлива и пр.

Однако экспериментальным путём мы увидели, что наша ракета поднялась в воздух на высоту около 6-7м. Так же мы заметили, что наша ракета сбилась с вертикального направления, это произошло из-за того, что корпус ракеты легко поддается изгибу.

Мы переделали наши ракету, чтобы улучшить лётные характеристики. Оставив без изменения саму ракету, мы установим два реактивных двигателя в верхнюю часть и установим более длинные стабилизаторы продольной устойчивости. Важным моментом в данной ракете – это одновременный запуск двигателей. Для этого мы уравнили длину фитильков и связали их, таким образом, мы добились одновременного зажигания.

Вторая модель поднялась на высоту 14-15м, и траектория полёта ракеты была вертикальная.

Модели ракеты:



Список литературы

1. А.А. Пинский «Физика. 8 класс»
2. А.М. Прохоров «Большой энциклопедический словарь»
3. С.В. Громов, Н.А Родина «Физика.8 класс»
4. http://ru.wikipedia.org/wiki/Заглавная_страница