Горелов Михаил
Ученик 11 физико-математического класса СОШ №33 с углублённым изучением отдельных предметов г. Петропавловска-Камчатского.

Казеев Александр
Ученик 11 физико-математического класса СОШ №33 с углублённым изучением отдельных предметов г. Петропавловска-Камчатского.

Ланцов Александр
Ученик 11 физико-математического класса СОШ №33 с углублённым изучением отдельных предметов г. Петропавловска-Камчатского.

Пугаченко Игорь
Ученик 11 физико-математического класса СОШ №33 с углублённым изучением отдельных предметов г. Петропавловска-Камчатского.

Реактивное движение и водяная ракета

Главными целями нашей работы были: создание установки, демонстрирующей реактивное движение, изучение принципа действия и устройства ракеты, а потом – её изготовление. О реализации этих целей мы и рассказываем.

Обратимся к теории

Принципиально все ракеты имеют одни и те же составные части: корпус *К* (рис. 1) обтекаемой формы, ракетный двигатель *Д* и его сопло *С*, бак с топливом *Т*, бак с окислителем *О* и полезный груз *ПГ*, ради транспортировки которого и создаётся ракета. Принцип её действия прост – он основан на реактивном движении, при котором ракета разгоняется за счёт выброса части своей массы: топливо и окислитель сгорают в специальной камере и из сопла с огромной скоростью выбрасываются газы (продукты сгорания). Ракета движется в противоположном направлении.

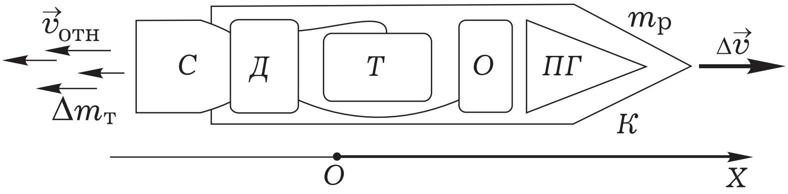
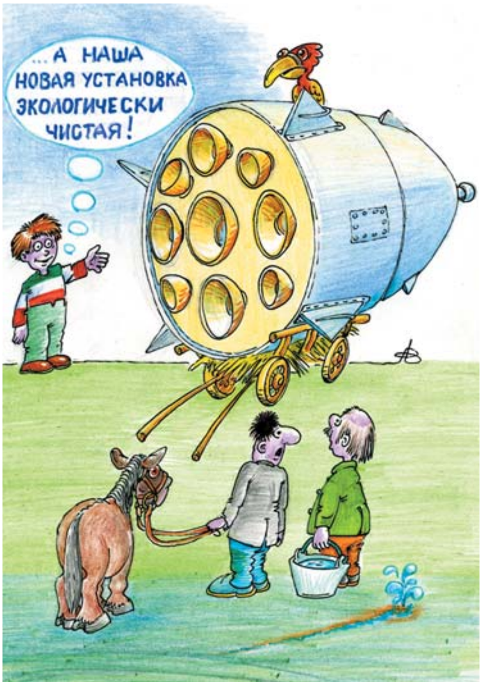


Рис. 1

Рассмотрим её движение в системе отсчёта, в которой в каждый момент времени ракета неподвижна (OX). Такую систему отсчёта называют сопутствующей. Пусть в данный момент времени масса ракеты равна $m_р$ и за небольшой интервал времени Δt сгорит и вылетит из неё часть топлива массой $\Delta m_т$. Скорость вылета продуктов сгорания из ракеты будет $\vec{v}_{отн}$ (считаем её постоянной). За тот же интервал времени скорость ракеты изменится на небольшую величину $\Delta\vec{v}$. В свободном пространстве система «ракета – сгоревшее топливо» замкнутая (внешних сил нет). Поэтому закон изменения импульса можно записать в следующем виде:



$$m_р\Delta\vec{v}+\Delta m_т\vec{v}_{отн}=\sum\vec{F}_{внеш}\cdot\Delta t=0. \quad (1)$$

Так как уменьшение массы ракеты равно увеличению массы сгоревшего топлива ($\Delta m_р=-\Delta m_т$), то уравнение (1) примет вид:

$$m_р\Delta\vec{v}=\Delta m_р\vec{v}_{отн}.$$

Разделим левую и правую части равенства на интервал времени, в течение которого происходят изменения:

$$\frac{m_р\Delta\vec{v}}{\Delta t}=\frac{\Delta m_р\vec{v}_{отн}}{\Delta t}.$$

Переходя к бесконечно малым изменениям, находим:

$$m_р\frac{d\vec{v}}{dt}=\frac{dm_р}{dt}\vec{v}_{отн}.$$

Мы получили второй закон Ньютона, где правая часть соотношения есть сила (внутренняя для системы), называемая реактивной силой.

Если же учесть «присутствие» внешних сил F (сил тяготения небесных тел: Земли, Солнца и др.), то получим уравнение Мещерского:

$$m_р\frac{d\vec{v}}{dt}=\frac{dm_р}{dt}\vec{v}_{отн}+\vec{F}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) при $\vec{F}=0$ в проекциях на ось OX можно получить стандартную форму дифференциального уравнения первого порядка (мы опускаем математические преобразования):

$$\frac{dm_р}{dv}=-\frac{1}{v_{отн}}m_р.$$

Его решение имеет простой вид:

$$m_р = Ae^{-\frac{v}{v_{отн}}}.$$

Для нахождения коэффициента A подставим в последнюю формулу значение $v=0$, тогда $m_р = A$. Но мы знаем, что ракета была неподвижной $(v=0)$ в начальный момент времени, значит, A равно стартовой массе ракеты. Обозначим её как $m_{р0}$, тогда

$$m_р = m_{р0}e^{-\frac{v}{v_{отн}}}. \qquad (3)$$

Это уравнение Циолковского. С его помощью можно узнать, например, какой запас топлива необходим для вывода ракетой на круговую околоземную орбиту 1 т полезного груза. Представив массу ракеты на старте как сумму конечной массы ракеты (уже без топлива) и массы топлива $(m_{р0} = m_р + m_т)$, подставим её значение в несколько преобразованное уравнение (3):

$$\frac{m_р}{m_р + m_т} = e^{-\frac{v}{v_{отн}}},$$

откуда масса топлива

$$m_т = m_р\left(e^{\frac{v}{v_{отн}}} - 1\right). \qquad (4)$$

Для определённости возьмём $v = 8$ км/с – первая космическая скорость, $v_{отн} = 2$ км/с – скорость истечения топлива из сопла, $e = 2{,}718281828$ – основание натуральных логарифмов.

Подставляя эти значения в формулу (4), получим $m_т = 53{,}6\, m_р$. Следовательно, для вывода на орбиту 1 т груза необходимо сжечь 53,6 т топлива. Понятно, что такой результат ракетчикам не по душе. Стремление уменьшить значение $m_т$ привело к созданию более эффективных видов топлива, обеспечивающих $v_{отн} = (3{,}5 - 4)$ км/с. Но и для них $m_т \approx (7\text{-}10)\, m_р$ (даже без учёта внешних сил). А если предположить, что мы захотели отправиться в космическое путешествие и решили развить скорость $v = 0{,}01\, c$, где $c = 3\cdot 10^8$ м/с – скорость света, то даже при $v_{отн} = 10$ км/с (что далеко от реальности) $m_т$ будет равно $10^{130} m_р$! На 1 т полезного груза придётся затратить 10^{130} т топлива (!!), тогда как, к примеру, масса Солнца равна $2\cdot 10^{30}$ кг. Ясно, что на химических двигателях с такими значениями $v_{отн}$ в грандиозные космические путешествия не отправишься. Нужны принципиально другие двигатели.

Что на практике

Прежде чем начать поиск новых двигателей, мы приступили к изготовлению простой модели ракеты, руководствуясь желанием, чтобы она всё-таки взлетела. Нам понадобились: пластиковая бутылка (1,5 л), ниппель, пробка, стартовая площадка, насос и вода.

Пластиковая бутылка в качестве корпуса ракеты (рис. 2) хороша тем, что она лёгкая и достаточно прочная.

Её горлышко герметично закрыли пробкой со вставленным ниппелем (пробку лучше всего взять от бутылки из-под шампанского или любую другую, которая подойдёт по размеру и будет плотно контактировать с ниппелем.) Мы использовали резиновую конусооб-

Рис. 2

разную пробку из оборудования кабинета физики (рис. 3). Ниппель можно вырезать из старой велосипедной или автомобильной камеры и вставить его герметично в предварительно просверленное в пробке отверстие.

Рис. 3

Сложнее всего было сделать стартовую площадку (рис. 4), так как требовалось: установить бутылку-ракету на опоре, обеспечить управление на расстоянии её запуском и возможность ракете взлететь при срабатывании пускового механизма. Кроме того стартовая площадка должна иметь приспособления для такого закрепления её в земле (в снегу), чтобы при запуске ракета летела вертикально.

Рис. 4

Фиксировать бутылку на стартовой площадке удобно с помощью двух горизонтально расположенных параллельных гвоздей, расстояние между которыми меньше диаметра пластикового ободка на горлышке и чуть больше диаметра горлышка (к гвоздям прикрепляется верёвка). Заполняем водой часть ёмкости бутылки, плотно закрываем её пробкой, ставим на стартовую площадку и зажимаем горлышко между двух гвоздей (рис. 5). Начинаем накачивать в бутылку воздух автомобильным насосом. Перестаём качать, когда давление достигает 5-6 атм. (Конструкция «бутылка – пробка – крепление» должна выдержать 6-7 атм; бутылки с трещинами могут лопнуть, поэтому лучше брать целые новые бутылки.) Далее отходим на безопасное расстояние и выдёргиваем гвозди за верёвку. Давление воздуха выталкивает воду, пробка вылетает из горлышка и струя бьёт из сопла вниз, а ракета летит вверх.

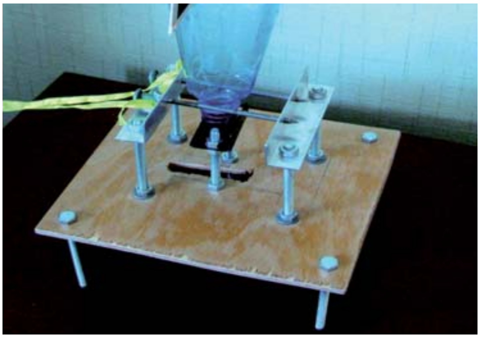


Рис. 5

Чтобы полёт этой ракеты был более стабильным, её необходимо оснастить носовым обтекателем и стабилизаторами. Первый (для уменьшения трения в полёте о воздух) мы соорудили из горлышка другой бутылки и теннисного шарика (см. рис. 2). Стабилизаторы сделали из пластика и фиксировали их скотчем. На рис. 6

Рис. 6

показана наша ракета в действии – она взлетает со стартовой площадки, причём хорошо видна струя воды.

Если же вам захочется запустить такую ракету, то, подготовив всё, как это делали мы, берите с собой друга (а лучше друзей) и захватите запас воды и насос. Сначала в качестве испытательного полигона вам вполне хватит школьного стадиона. Минимальное системное требование: две руки (для ручного насоса); рекомендуемые системные требования: четыре руки, одна голова, одна нога (для ножного насоса).