Государственная корпорация по космической деятельности Роскосмос

Министерство просвещения Российской Федерации

**Методические рекомендации по выполнению**

**практических работ**

по программе

**Аэродинамика и баллистика**

г. Москва, 2020 г.

Оглавление

[**Предисловие** 3](#_Toc78564538)

[**1. Организация практических работ по учебной дисциплине «Аэродинамика и баллистика»** 4](#_Toc78564539)

[1.1. Общие положения 4](#_Toc78564540)

[1.2. Проведение практических работ 5](#_Toc78564541)

[1.3. Оформление отчета по практическим работам 6](#_Toc78564542)

[**Практические работы** 8](#_Toc78564543)

[**Практическая работа № 1** 8](#_Toc78564544)

[**Урок 3.** 8](#_Toc78564545)

[**Практическая работа № 2** 10](#_Toc78564546)

[**Урок 5.** 10](#_Toc78564547)

[**Практическая работа № 3** 12](#_Toc78564548)

[**Урок 6.** 12](#_Toc78564549)

[**Практическая работа № 4** 15](#_Toc78564550)

[**Урок 10.** 15](#_Toc78564551)

[**Практическая работа № 5** 17](#_Toc78564552)

[**Урок 12:** 17](#_Toc78564553)

[**Практическая работа № 6** 20](#_Toc78564554)

[**Урок 15.** 20](#_Toc78564555)

[(2) 23](#_Toc78564556)

[**Практическая работа № 7** 25](#_Toc78564557)

[**Урок 18.** 25](#_Toc78564558)

[**Практическая работа № 8** 29](#_Toc78564559)

[**Урок 20.** 29](#_Toc78564560)

[**Практическая работа № 9** 33](#_Toc78564561)

[**Урок 26.** 33](#_Toc78564562)

[**Практическая работа № 10** 35](#_Toc78564563)

[**Урок 34.** 35](#_Toc78564564)

[**Практическая работа № 11** 38](#_Toc78564565)

[**Урок 38.** 38](#_Toc78564566)

[**Практическая работа № 12** 42](#_Toc78564567)

[**Урок 41.** 42](#_Toc78564568)

[**Практическая работа № 13** 46](#_Toc78564569)

[**Урок 45.** 46](#_Toc78564570)

[**Практическая работа № 14** 50](#_Toc78564571)

[**Урок 49.** 50](#_Toc78564572)

[**Список литературы** 55](#_Toc78564573)

[Основная литература 55](#_Toc78564574)

[Дополнительная литература 55](#_Toc78564575)

# **Предисловие**

Методические рекомендации по практическим работам содержат материал для освоения теоретического материала, через практические работы. Практические работы проходят в 1 полугодии, для учащихся 8 класса.

Выполнение обучающимся практических занятий направлено на:

* обобщение, систематизацию, углубление, закрепление полученных теоретических знаний по данной дисциплине;
* формирование умений применять полученные знания на практике, реализацию единства интеллектуальной и практической деятельности;
* развитие интеллектуальных умений у будущих специалистов: аналитических, проектировочных, конструктивных и др.;
* выработку при решении поставленных задач таких профессионально значимых качеств, как самостоятельность, ответственность, точность, творческая инициатива.

Методические рекомендации разработаны с целью единого подхода к организации и проведению практических занятий. В предлагаемых материалах даны понятия практическим занятиям, рассмотрены их основные дидактические цели, формируемые умения и навыки, содержание. Раскрыта структура проведения практического занятия.

# **1. Организация практических работ по учебной дисциплине «Аэродинамика и баллистика»**

## 1.1. **Общие положения**

Актуальность применение методических рекомендаций по выполнению практических работ по изучаемой дисциплине определяется сложностью преподаваемого материала для основной массы данной возрастной категории учащихся.

Методические рекомендации помогают направить учащихся по правильному пути достижения цели в решении задач или в построении математических и физических моделей.

*Цель практических работ*:

Обучить решению задач по дисциплине, сформировать у учащихся потенциал знаний и умений для дальнейшего более углубленного изучения дисциплин данной направленности.

*Задачи*:

* развить интерес учащихся к пониманию законов аэродинамики и баллистики;
* сформировать умения и навыки самостоятельного сбора узконаправленной, специфичной информации для решения практических задач.

Практическое занятие должно проводиться в учебных кабинетах или специально оборудованных помещениях (компьютерном классе и т.п.). Продолжительность занятия один академический час. Необходимыми структурными элементами практического занятия, помимо самостоятельной деятельности учащихся, являются инструктаж, проводимый учителем, а также анализ и оценка выполненных работ и степени овладения учащимися запланированными умениями.

**Дидактические цели практических занятий:** формирование умений, необходимых для изучения последующих дисциплин (модулей) и для будущей профессиональной деятельности.

## **1.2. Проведение практических работ**

*Вводная часть:*

* организационный момент;
* мотивация учебной деятельности;
* постановка темы, постановка целей;
* выполнение задания из рабочей тетради.

*Самостоятельная работа обучающегося:*

* учащиеся индивидуально (решение задач) или в группах по 2 человека (моделирование) выполняют задание из рабочей тетради;
* если самостоятельная работа представлена в виде доклада учащегося по соответствующей теме, то остальные учащиеся должны участвовать в обсуждении доклада (длительность доклада должна быть не менее 5-7 минут, обсуждение доклада 3-5 минут);
* составление отчета;
* при необходимости представить обобщение и систематизация полученных результатов (таблицы, графики, схемы и т.п.).

*Заключительная часть:*

* подведение итогов занятия: анализ хода выполнения и результатов работы обучающихся
* выявление возможных ошибок и определение причин их возникновения.

Особенности и основные траектории выполнения заданий: осмысление задания, сбор необходимой информации, выбор вектора решения задачи, решение.

Форма организации учеников на заданиях: фронтальная (выполняют одновременно одну и ту же работу).

*Педагогическое руководство:*

* четкая постановка познавательной задачи;
* инструктаж к работе (осмысление обучающимися сущности задания, последовательности его выполнения);
* проверка теоретической и практической готовности обучающихся к занятию;
* выделение возможных затруднений в процессе работы;
* установка на самоконтроль;
* наблюдение за действиями обучающихся, регулирование темпа работы, помощь (при необходимости), коррекция действий, проверка промежуточных результатов.

## **1.3. Оформление отчета по практическим работам**

Отчет по практической работе выполняется в печатной или письменной форме, согласно заданию.

Отчеты должны содержать:

* титульный лист (приложение),
* тему практической работы,
* цели и задачи практической работы,
* список материалов и оборудования, для проведения занятия,
* ход проведения работы,
* вывод о полученных результатах проведенной работы,
* список контрольных вопросов и заданий.

В случае практической работы в виде доклада учащегося в отчете (раздел «ход проведения работы») должно быть: конспект доклада в виде тезисов (не менее 2-3 тезисов) и вопросы, которые были заданы докладчику после выступления. Сам докладчик представляет в разделе «ход проведения работы» реферат по докладываемой теме. За время изучения дисциплины каждый учащийся должен сделать не менее одного доклада.

Отчет по практическим занятиям следует оформлять в виде таблиц, графиков, схем, структур, графических записей, образов, рисунков, аппликаций, расчетов, сравнительного анализа, решения конкретных производственных задач и ситуаций и т.д. Для улучшения закрепления пройденного материала, необходимо применение рабочей тетради по дисциплине.

**Практические работы**

**Практическая работа № 1**

**Урок 3.**

Тема: Возникновение и развитие аэродинамики как науки.

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* воспитать интерес к изучению истории авиации и аэродинамики;
* воспитать логическое мышление, внимание, словесно-логическую память;
* развить воображение, сообразительность, познавательный интерес.

**Ход практического занятия:**

Среди гениев эпохи Возрождения можно выделить Леонардо Да Винчи. Он предложил множество оригинальных конструкций. Некоторые мы подробнее разберем на следующем уроке. Теперь обратимся к разработкам нашего соотечественника, Михаила Васильевича Ломоносова. Среди его работ также был вертолет. Эта конструкция предназначалась для подъема на высоту не людей, а измерительных приборов.

Современная вычислительная техника не позволяет нам вести расчеты, учитывающие движение каждой молекулы вещества. Поэтому математическое моделирование связано с так называемой дискретизацией задачи. Т.е. мы учитываем только часть информации о реальном процессе. Дискретизация может проводится различными методами. Наиболее часто встречается учет параметров в ограниченном наборе точек, представляющих собой расчетную сетку.

В наше время для построения прогноза погоды используется информация, собранная в узлах как Эйлеровой (стационарные метеостанции), так и Лагранжевой сеток. Узлами последней модно считать метеозонды, запускаемые на различные высоты в атмосферу. Часть этих зондов поднимаются в стратосферу.

Существуют две основные схемы управления летательными аппаратами – это балансирная и аэродинамическая. Типичный пример балансирного управления – дельтаплан.

Встретив на своем пути преграду, поток жидкости или газа, естественно, будет перестраиваться, реагируя на ее наличие. При этом параметры потока изменятся не везде, а только в ограниченной области, получившей название «пограничный слой».

Аэродинамическая сила, действующая на обтекаемое потоком тело, зависит не только от размеров этого тела, но и от режима течения газа вокруг него. Таких основных режимов два: ламинарный и турбулентный.

**Далее заслушиваются доклады учащихся по теме:**

1. Вертолет Да Винчи. Обоснование формы несущего винта.

2. Причины выбора Ломоносова между вертолетом и воздушным шаром.

3. Лагранжевы и Эйлеровы сетки. Факторы, определяющие выбор между ними.

4. Стратостаты. Почему их запускают «полуспущенными»?

5. Принцип управления дельтапланом. Как удается обойтись без рулей?

6. Пограничный слой и его влияние на обтекание тел.

7. Ламинарное и турбулентное течение. Причины смены режима.

После каждого доклада необходимо обсудить основные моменты с учащимися. Учащиеся должны задать 2-3 вопроса по теме доклада.

Длительность доклада 5-7 минут. Обсуждение, вопросы – 3-5 минут.

В отчете учащиеся должны указать тему доклада, основные моменты доклада в виде тезисов (2-3 тезиса), заданные вопросы докладчику.

Докладчик в отчете должен представить реферат по теме доклада.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 2**

**Урок 5.**

Тема: «Строение земной атмосферы».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* научиться решать задачи по теме атмосферное давление;
* сформировать навыки решения задач и анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Формула аэродинамической силы включает комплекс из скорости полета и плотности воздуха, который принято называть скоростным напором.

Плотность воздуха с высотой уменьшается. Чтобы произведение сохраняло значение при уменьшении одного множителя требуется, чтобы второй (скорость) возрастал.

Изменение давления с высотой практически у всех атмосферных планет подчиняется единому экспоненциальному закону, где

P0 – давление на поверхности;

h – высота;

k – индивидуальный коэффициент для каждой атмосферы.

График изменения температуры с ростом высоты индивидуален для каждой планеты и зависит, главным образом, от химического состава на данной высоте.

**Задание.**

Определить давление на высоте 8000 м, полагая давление на поверхности Земли равным 105 Па. Атмосферное давление уменьшается вдвое при подъеме на каждые 5500 м.

**Решение**

Подобное изменение давления можно описать так называемым экспоненциальным уравнением вида

Из данных задачи следует, что

Соответственно

Отсюда находим

Теперь подставим в исходную формулу наши данные

Ответ: Давление на высоте 8000 м составит 3649 Па..

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 3**

**Урок 6.**

Тема: "Строение земной атмосферы".

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* получить навыки в решении задач на определение массы, нахождение содержания водяного пара в воздухе;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Плотность воздуха с высотой уменьшается. Чтобы произведение сохраняло значение при уменьшении одного множителя требуется, чтобы второй (скорость) возрастал.

Изменение давления с высотой практически у всех атмосферных планет подчиняется единому экспоненциальному закону, где

P0 – давление на поверхности;

h – высота;

k – индивидуальный коэффициент для каждой атмосферы.

График изменения температуры с ростом высоты индивидуален для каждой планеты и зависит, главным образом, от химического состава на данной высоте.

В случае Земли выделяют несколько слоев:

1. Тропосфера. Простирается до высоты 8 ÷ 18 км в зависимости от времени года и географической широты (меньше на полюсах и больше на экваторе). Температура в тропосфере с высотой снижается примерно на 6.5℃ на каждый километр.
2. Стратосфера. Расположена над тропосферой до высоты 50 км. Температура в нижней части (до 25 км) остается практически постоянной. Далее температура растет и на высоте около 40 км достигает 0℃. После этого она практически не меняется до высоты ~55 км.
3. Мезосфера. Простирается до высоты 90 км. Температура в ней снижается на 2.5 ÷ 3℃ на км.
4. Термосфера. До высоты 800 км. Температура растет до 200 ÷ 300 км. На этой высоте она примерно 1500 К. Далее остается почти постоянной.

**Задание.**

*Задача 1.* Найти массу слитка при плотности воздуха . В помещение объемом 54 м3 заполненное воздухом при температуре 20° внесли железный слиток, нагретый до 200°. В результате температура воздуха увеличилась до 25°.

*Задача 2.* Найти содержание водяного пара в воздухе при 100 % влажности. Теплоемкость сухого воздуха . Теплоемкость водяного пара . Теплоемкость воздуха при 100% влажности .

**Решение**

*Задача 1.* После вноса слитка, он будет остывать, а воздух в помещении прогреваться до установления теплового равновесия.

Изменение внутренней энергия слитка может быть определено как

(1)

В отличие от твердых тел и жидкостей, у газов рассматриваются две различных теплоемкости, получившие названия «теплоемкость при постоянном давлении» и «теплоемкость при постоянном объеме», различающиеся на величину так называемой молярной (или универсальной) газовой постоянной. При этом большей является теплоемкость при постоянном давлении, т.е.

Поскольку задача имеет смысл только для изолированного помещения, будем использовать теплоемкость при постоянном объеме. Также пренебрегаем изменением объема помещения при вносе в него слитка.

Энергия, полученная воздухом, равна

(2)

Поскольку в формулах (1) и (2) речь идет об одной и той же энергии, можно приравнять правые части

Отсюда выразим массу слитка

Ответ: масса слитка составила 73,43 кг.

*Задача 2.* Удельная теплоемкость вещества показывает, сколько энергии требуется сообщить килограмму вещества для поднятия его температуры на 1 К. Согласно закону сохранения, вся подводимая энергия распределяется на сухой воздух и содержащийся в нем пар, т.е.

(1)

Поскольку нас интересует не масса пара, а его доля в составе влажного воздуха, можем принять массу влажного воздуха за единицу:

(2)

Тогда сами массы становятся массовыми долями и уравнение (1) записывается в виде:

Раскрывая скобки и приводя подобные, получим:

Соответственно

Остался вопрос: в данных задачи влажность была 100%, а в результате расчета получилось 2.6%. Почему? Дело в том, что в относительной влажности указывается содержание пара не от массы влажного воздуха, а от его содержания в состоянии насыщения, т.е. от полученных 2.6% массы влажного воздуха.

Ответ: содержание пара в воздухе при 100% влажности составила 2,6%.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 4**

**Урок 10.**

Тема: «Способы создания подъемной силы»

**Количество часов:** 1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* освоить методы решения задач на определение скорости воздушного потока, объема монгольфьера;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Из закона Архимеда следует, что подъемная сила аэростата зависит от соотношения средних плотностей аппарата и среды. Поскольку плотность – это отношение массы тела к объему, управлять средней плотностью можно изменяя либо объем аппарата, либо его массу.

Для изменения объема аппарат должен содержать в своем составе эластичную оболочку, заполняемую из бортовых баллонов легким газом (водородом или гелием).

Если заполнение оболочки можно обеспечить за счет запаса давления в баллонах, то обратный процесс потребует наличия на борту специального компрессора.

Аэродинамическая сила зависит от размеров тела (площадь миделя), плотности и скорости движения воздушного потока (скоростной напор), формы и режима обтекания тела (коэффициент аэродинамической силы).

**Задание.**

Рассчитать скорость воздушного потока, если плоскость массой 10 кг и площадью 1 м2, установленная под углом к потоку 5º, поднимется в воздух? Коэффициент аэродинамической силы принять равным 1.2, плотность воздуха – 1 кг/м3.

***Решение задач.***

Скорость набегающего потока разложим на две составляющие: параллельную плоскости и перпендикулярную . Аэродинамическая сила будет создаваться только последней. Значение этой скорости равно:

Соответственно значение аэродинамической силы:

Плоскость поднимает вверх вертикальная проекция этой силы:

Приравняв эту силу к весу плоскости, выражаем скорость:

Ответ: скорость воздушного потока 147 м/с.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 5**

**Урок 12:**

Тема: «Обтекание плоского крыла воздушным потоком. Угол атаки. Силы, действующие на летательный аппарат»

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* освоить решение задач на определение подъемной силы плоского крыла при ламинарном режиме обтекания;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Воздушный поток оказывает давление на преграду, направленное в каждой точке перпендикулярно ее поверхности. Равнодействующую сил этого давления разложим на две составляющие, получившие названия подъемной силы (Fy) и лобового сопротивления (Fx). Соотношение между ними получило название аэродинамического качества.

Его значение зависит от угла α, под которым поток обтекает нашу плоскость. Этот угол получил наименование «угол атаки».

Помимо аэродинамических сил, на аппарат также действует вес и (в случае наличия) тяга двигателя. Скорость потока направлена от центра масс к центру давления. Это означает, что для устойчивого равновесия центр масс должен быть впереди центра давления. С учетом этого строим схему приложения сил для прямолинейного горизонтального полета (mg – вес, Fт – приложенная в центре давления сила тяги двигателя, Fx и Fy – компоненты аэродинамической силы). В результате видим, что такая система сил при нулевой равнодействующей создает момент, опускающий нос самолета.

Чтобы избежать такой ситуации требуется дополнительная сила, либо поднимающая нос, либо опускающая хвост. Для ее создания служит горизонтальное оперение, расположенное в хвосте (классическая схема) или в носу (схема «утка»).

С точки зрения прочности схема «утка» выгоднее, т.к. создает меньше поперечных нагрузок на конструкцию. Но она используется редко ввиду дополнительных проблем с аэродинамикой.

Безмоторные аппараты (планеры) не имеют собственного источника тяги. Вместо этого они используют в качестве тяги составляющую подъемной силы, направленную вперед. Для этого планер должен постоянно снижаться относительно окружающего его воздуха.

**Задание.**

*Задача 1.* Найдите площадь миделя цилиндра диаметром 2м и длиной 10м, обтекаемого потоком при угле атаки 15°.

*Задача 2.* Найдите подъемную силу плоского треугольного крыла с размахом 10 и корневой хордой 2 метра при ламинарном режиме обтекания с углом атаки 5°. Скорость воздушного потока 20 м/с. Коэффициент аэродинамического сопротивления плоской пластины при угле атаки 90° равен 1.2, плотность воздуха 1.2 кг/м3.

**Решения.**

*Задача 1.*

15°

Миделем называется максимальное по площади сечение тела плоскостью, перпендикулярной вектору скорости набегающего потока. В нашем случае это – вертикальная плоскость. Сечение цилиндра такой плоскостью представляет собой эллипс, меньшая ось которого равна диаметру цилиндра:

а большая – приведенному на рисунке вертикальному отрезку. Его длину можно определить из треугольника:

Площадь эллипса вычисляется по формуле:

Остался вопрос: для чего была задана длина цилиндра? Нам предварительно требовалось убедиться в том, что миделево сечение не пересекает торцевые поверхности цилиндра, т.е. что данная длина больше нижней стороны треугольника.

Ответ: площадь миделя составила 3,25 м2.

*Задача 2.* Плоская пластина создает аэродинамическую силу, направленную перпендикулярно ей.

5°

Значение этой силы можно найти по формуле аэродинамического сопротивления плоской пластины, расположенной перпендикулярно потоку. Для этого найдем проекцию скорости потока на направление вектора аэродинамической силы.

Площадь треугольного крыла равна половине площади габаритного прямоугольника:

Аэродинамическую силу найдем по формуле:

Но это сила, перпендикулярная плоскости крыла. Подъемной силой является ее проекция на вертикальную ось:

Ответ: подъемная сила треугольного крыла составила 21,72 Н.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 6**

**Урок 15.**

Тема: «Закон Бернулли».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* освоить решение задач по теме закона Бернулли;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Чем выше скорость потока, тем меньшее давление он оказывает на «боковую» поверхность. Обобщением этого правила является закон Бернулли, который можно считать формой записи закона сохранения энергии для движущегося потока жидкости или газа.

Уравнение в целом можно рассматривать как форму записи закона сохранения механической энергии в потоке.

Размерность всех трех слагаемых – метр. Значит, их можно измерить с помощью линейки.

Обычно в лабораторных условиях для этого используется так называемая «трубка Вентури». Это труба переменного сечения. Поскольку в данном случае она расположена горизонтально, то z = const и ее можно из рассмотрения исключить. При сжатии дозвукового потока его скорость возрастает. При постоянном первом слагаемом и возрастающем третьем второе должно уменьшаться, что и демонстрируют уровни жидкости в вертикальных трубках.

Такие, расположенные перпендикулярно скорости потока, трубки принято называть пьезометрами, а соответствующий уровень жидкости в них – пьезометрическим напором. В уравнении Бернулли ему соответствует второй член: .

Аналогичное уравнение можно применять и в авиации для определения «воздушной» скорости самолета. Для этого используют специальный приемник воздушного давления, именуемый «трубкой Пито - Прандтля». Его отличие от современных трубок Вентури в том, что здесь, помимо боковой трубки «пьезометра» есть отверстие, развернутое против потока, так называемая «трубка полного напора».

Это отверстие позволяет определить величину, соответствующую сумме двух последних слагаемых:.

При аэродинамическом управлении эффективность рулей зависит от величины скоростного напора. Поэтому для определения требуемого угла отклонения руля надо учитывать данную величину. Если полет протекает на фиксированной высоте, Табличное значение плотности воздуха постоянно и его можно учесть без использования трубки Пито – Прандтля.

**Задание.**

*Задача 1.* Определить скорость в узком сечении трубопровода, если по горизонтальному трубопроводу переменного сечения движется жидкость (рис.1), плотность которой ρж = 700 кг/м3. Диаметр в широком сечении трубопровода *d1* = 5 см, а в узком *d*2 = 2 см, разность уровней в дифференциальном манометре, заполненном глицерином с плотностью ρг = 1250 кг/м3, составляет *h*= 28 см.

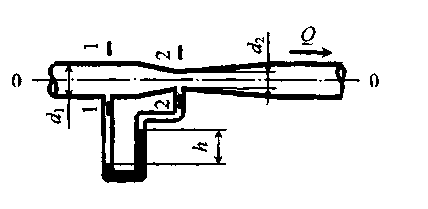


Рис.1

*Задача 2.* Определить расход *Q* и давление воды в сечении *х-х* сифонного трубопровода (рис. 2), пренебрегая потерями напора. Верхняя точка оси трубопровода расположена выше уровня воды в резервуаре на *Н =* 1 м, а нижняя - ниже на *h =* 3 м. Внутренний диаметр трубопровода *d =* 20 мм.

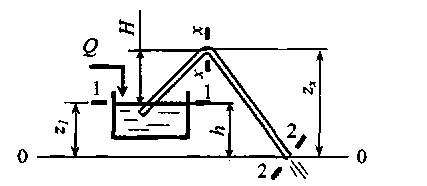


Рис. 2

**Решения.**

*Задача 1.* Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 отно­сительно плоскости сравнения 0-0. За плоскость сравнения целесообразно выбрать горизонтальную плоскость, совпадающую с осью трубопровода, а сечения назначить в широкой и узкой части трубопровода в местах при­соединения дифференциального манометра. Тогда

(1)

В уравнении (1) известно, что z1 = z2 = 0. С достаточной степенью точности можно принять α1 = α2 = 1

Разность давлений в сечениях с учетом разных жидкостей и их плотности в дифференциальном манометре определяется

(2)

где ρг, ρж - плотности соответственно глицерина и жидкости в дифференциальном манометре.

Из уравнения неразрывности потока (напомним, что *ω* – площадь живого сечения потока)

(3)

выразим

(4)

Подставляя (2) и (4) в (1), получаем

(5)

(6)

Отсюда

(7)

Подставляя численные значения величин получим

Ответ: скорость в узком сечении трубопровода составила 2,1 м/с.

*Задача 2.* Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 относительно плоскости сравнения 0-0. За плоскость сравнения целесообразно выбрать горизонтальную плоскость, проходящую через нижнюю точку трубопровода. Сечение 1-1 совпадает с уровнем жидкости в питающем резервуаре, а сечение 2-2 с выходом жидкости из трубопровода. Тогда

(8)

Рассмотрим значения величин входящих в уравнение Бернулли: z1 = *h*; z2 = 0. На поверхность жидкости в питающем резервуаре и на выходе из трубопровода действует атмосферное давление ратм, поэтому . Принимаем . Скорость изменения уровня в резервуаре , так как в резервуар поступает расход *Q* и уровень воды в нем постоянный. Подставляя полученные значения в (8) получим

(9)

Выразим скорость

(10)

После подстановки численных значений

Расход определяется по формуле

(11)

После перевода численных значений в основные единицы системы СИ и подстановки

Для расчета абсолютного давления в верхней точке трубопровода составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и *х-х* относительно плоскости сравнения 0-0

(12)

Рассмотрим значения величин, входящих в уравнение Бернулли: z1 *= h·, z2 = h + Η; p*1*= pатм.* Принимаем α1 = αx ≈ 1; υ1 = 0. Скорость движения жидкости в трубопроводе постоянного сечения одинакова υx= υ2. Подставляя полученные значения в (12) получим

(13)

Выразим давление в сечении *х-х*

(14)

Принимая нормальное атмосферное давление ратм =101 кПа, плотность воды р = 1000 кг/м3 и подставляя значения имеем

Ответ: давление воды в сечении *х-х* сифонного трубопровода составило 61760 Па.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 7**

**Урок 18.**

Тема: «Обтекание воздушным потоком твердых тел различной формы. Симметричное и несимметричное обтекание».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* освоить решение задач на определение подъемной силы;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Из сформулированных раннее уравнений Бернулли и неразрывности следует, что разогнать дозвуковой поток до большей скорости можно не только уменьшая его сечение (трубка Вентури), но и увеличивая длину траектории. Если над крылом воздушный поток будет двигаться быстрее, чем под ним, то давление сверху уменьшится и эта разность давлений создаст подъемную силу даже при нулевом или отрицательном угле атаки.

Профили для дозвуковых летательных аппаратов разделяют на:

1. Вогнуто-выпуклые.

Обладают максимальной подъемной силой. Используются в тяжелых транспортных самолетах. Минус такого профиля – более высокое лобовое сопротивление.

1. Плоско-выпуклые.

Предназначены для полета на малых высотах, в режиме так-называемого «аэродинамического экрана".

1. S-образные профили.

Обладают интересной особенностью. При увеличении угла атаки они «меняют кривизну» на обратную, что приводит к уменьшению этого угла. Они используются на аппаратах типа «летающее крыло».

1. Симметричные профили.

Образуют подъемную силу только за счет угла атаки. В этом они аналогичны плоскому крылу. Их достоинство состоит в том, что они позволяют долгое время летать в перевернутом положении – «вверх ногами». Соответственно используются в пилотажных самолетах и авиамоделях.

Если первым авиаконструкторам приходилось решать сложную задачу оптимизации, т.е. думать над тем, насколько можно позволить себе увеличить подъемную силу, чтобы не сильно выросло лобовое сопротивление, то сейчас эта задача решается более изящным способом.

Научились строить крылья с изменяемой кривизной профиля. При взлете и посадке кривизну увеличивают, получая рост подъемной силы, а при крейсерском полете уменьшают, уменьшая лобовое сопротивление на высоких скоростях.

"Полный вариант" механизации крыла отличается от обычного закрылка тем, что при выпуске изменяет не только кривизну профиля, но и «ширину» - хорду крыла.

Щелевые предкрылки позволяют дополнительно управлять воздушным потоком над крылом. При полете на крейсерском режиме они плотно прилегают к крылу, уменьшая лобовое сопротивление.

При переходе на большие углы атаки предкрылки «выпускаются» разбивая поток перед крылом на две части. Их дальнейшее взаимодействие позволяет дополнительно «прижать» поток к крылу, увеличивая зону ламинарности и уменьшая зону турбулентности, приводящую к отрыву потока.

**Задание.**

*Задача 1.* Оценить подъемную силу прямоугольного крыла площадью 10 м2, профиль которого представляет собой верхнюю половину эллипса с габаритными размерами 2 х 0.2 м. Угол атаки 0°, скорость потока 20 м/с, плотность воздуха 1.2 кг/м3.

*Задача 2.* Найти кривизну профиля, заданного таблицей.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| X, % | 0 | 2,5 | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| Yв, % | 0 | +2,74 | +3,94 | +5,48 | +7,00 | +7,55 | +7,29 | +6,52 | +5,52 | +4,28 | +2,90 | +1,45 | 0 |
| Yн, % | 0 | -0,866 | -1,26 | -1,77 | -2,33 | -2,61 | -2,63 | -2,51 | -2,29 | -1,93 | -1,48 | -0,91 | 0 |

**Решения.**

*Задача 1.*

2 м

0.2 м

В данном случае подъемную силу можно определить на основании уравнения Бернулли. Будем полагать, что у нас отсутствует такое явление, как отрыв потока от поверхности крыла. Тогда разность скоростей движения воздуха над и под крылом можно определить из разности длин верхнего и нижнего обводов крыла.

Длина нижнего обвода 2 метра, а для верхнего можно использовать формулу определения длины эллипса:

Здесь *R* и *r* – длины большей и меньшей полуосей, т.е. в нашем случае имеем:

Соответственно средняя скорость потока под крылом , а над ним .

Теперь запишем уравнение Бернулли. При этом пренебрегаем разностью высот этих потоков

Подъемная сила создается разностью давлений

Умножая эту разность на площадь крыла, получаем подъемную силу

Ответ: подъемная сила прямоугольного крыла составила 691,74 Н.

*Задача 2.* Для решения данной задачи требуется определить координаты точек средней линии данного профиля. Это среднее арифметическое координат Yв и Yн.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Yв, % | 0 | +2,74 | +3,94 | +5,48 | +7,00 | +7,55 | +7,29 | +6,52 | +5,52 | +4,28 | +2,90 | +1,45 | 0 |
| Yн, % | 0 | -0,866 | -1,26 | -1,77 | -2,33 | -2,61 | -2,63 | -2,51 | -2,29 | -1,93 | -1,48 | -0,91 | 0 |
| Yср, % | 0 | 0,937 | 1,34 | 1,855 | 2,335 | 2,47 | 2,33 | 2,005 | 1,615 | 1,175 | 0,71 | 0,27 | 0 |

Кривизна профиля определяется максимальной из полученных координат средней линии, т.е. в нашем случае это 2,47%. Мы можем определить только относительную величину. Реальное значение получится при перемножении полученного числа на размер хорды крыла.

Ответ: кривизна профиля составила 2,47%.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 8**

**Урок 20.**

Тема: «Динамические критерии подобия. Число Рейнольдса».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* получить навыки расчета задач с применением числа Рейнольдса;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации;

**Ход практического занятия:**

При моделировании режимов обтекания тел принимается так называемая «гипотеза прилипания», т.е. считается, что частицы, непосредственно примыкающие к поверхности тела, относительно этой поверхности неподвижны. Далее, в слое сравнительно небольшой толщины, получившем название «пограничный слой», скорость частиц возрастает до скорости основного потока.

После того, как произошло «закручивание» частиц, поток становится «турбулентным». В любом турбулентном потоке сохраняется ламинарная часть погранслоя, но ее толщина уменьшается и в пределе стремиться к нулю.

Движение жидкости или газа можно описать как состоящее из отдельных слоев. Такое движение принято называть «ламинарным».

После того, как произошло «закручивание» частиц, поток становится «турбулентным». В любом турбулентном потоке сохраняется ламинарная часть погранслоя, но ее толщина уменьшается и в пределе стремиться к нулю.

Для того, чтобы результаты аэродинамического эксперимента можно было «пересчитать» с модели на реальный аппарат, их обтекание должно быть подобным.

Для обеспечения этого подобия требуется, чтобы некоторые соотношения между параметрами обоих потоков сохранялись. Одним из таких параметров является характеризующее отношение сил инерции к силам вязкости число Рейнольдса.

Именно критическое значение этого числа определяет переход ламинарного течения в турбулентное. Конкретные значения критических чисел Рейнольдса зависят от вида исследуемого течения. При этом входящие в состав формулы параметры могут принимать различные значения.

**Задание.**

*Задача 1.* По трубе диаметром *d —* 20 см под напором движется минеральное масло с температурой *t* = 30 °C (рис. 1). Определить критическую скорость и расход, при котором происходит смена режимов движения жидкости. График зависимости кинематического коэффициента вязкости жидкости от температуры показан на рис. 2. В качестве критического значения числа Рейнольдса принять 2300.

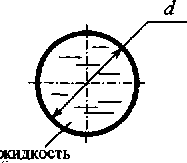


Рис. 1

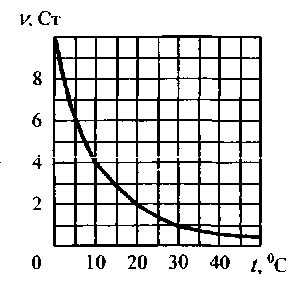


Рис. 2 График зависимости

кинематического коэффициента

вязкости жидкостиот температуры

*Задача 2.* Жидкость движется в лотке (Рис. 3) со скоростью *v*= 0,1 м/с. Глубина наполнения лотка *h =*30 см, ширина по верху *В*= 50 см, ширина по низу *b*= 20 см. Определить смоченный периметр, площадь живого сечения, гидравлический радиус, расход, режим движения жидкости, если динамический коэффициент вязкости *μ*= 0,0015 Па\*с, а плотность *ρ*= 1200 кг/м3. В качестве критического числа Рейнольдса использовать значение по гидравлическому радиусу, равное 580.

**Решения задач.**

*Задача 1.* Смена режимов произойдет при скорости, соответствующей критическому числу Рейнольдса. Для круглых напорных трубопроводов расчет выполняется по критическому числу Рейнольдса приведенному к диаметру трубопровода Redкр.

(1)

отсюда

(2)

По графику (Рис. 2) при температуре *t* =30 °C находим вязкость масла *ν*= 1 Ст = 10-4м2/с. Подставляя значения величин в основных единицах измерения системы СИ в формулу (2) будем иметь

Расход определяем по формуле (4)

Площадь живого сечения трубопровода

(3)

Тогда расход будет равен

(4)

После подстановки значений величин получим

Ответ: критическая скорость составила 1,15 м/с, а расход 0,0361 м3/с.

*Задача 2.* Смоченный периметр определяется следующим образом

(5)

Подставляя в формулу значения величин в основных единицах системы СИ, имеем

Площадь живого сечения потока будет равна площади прямоуголь­ной трапеции

(6)

После подстановки численных значений величин имеем

Гидравлический радиус представляет собой отношение площади живого сечения к смоченному периметру:

Определяем расход жидкости по формуле

Режим движения жидкости для произвольного профиля определяется через гидравлический радиус по числу Рейнольдса по формуле (1). Кинематический коэффициент вязкости жидкости связан с динамическим коэффициентом вязкости соотношением

Подставляя это выражение в формулу для числа Рейнольдса, имеем

После подстановки численных значений получим

Полученное число Рейнольдса больше критического по гидравлическому радиусу 9120 > 580. Следовательно, режим движения турбулентный.

Ответ: смоченный периметр составил 0,924 м, аплощадь живого сечения 0,105 м2, расход жидкости 0,0105 м3/с, гидравлический радиус 0,114 м, число Рейнольдса 9120, соответственно режим движения турбулентный.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 9**

**Урок 26.**

Тема: «История возникновения баллистики».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* воспитать интерес к изучению истории баллистики;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Началом математического исследования траекторий полета тел принято считать XVI век, а родоначальником – Никколо Тарталья. Именно в его работе впервые называется угол «максимальной дальности» в 45° и утверждается, что вся траектория – кривая линия.

Никколо Тарталья более известен как автор формулы корней кубического уравнения, которую мы знаем как «формулу Кардано». Дело в том, что Никколо отправил свое решение Джероламо Кардано. Тот его опубликовал, честно указав, что решение получено от Тартальи. Но приоритет первой публикации превысил приоритет авторства.

До него считали, что траектория состоит из двух прямолинейных участков, соединенных в районе вершины дугой. Сейчас мы в качестве первого приближения принимаем параболическую траекторию.

Эта траектория была впервые описана Галилео Галилеем. Объяснить форму траектории он не смог, но высказал мнение, что данная траектория симметрична и путь до вершины и от вершины до цели занимает одинаковое время.

Воздействие среды на движущиеся в ней тела одним из первых стал изучать Исаак Ньютон. Его работы относились к малым скоростям движения. Опыты, связанные с измерением начальной скорости снаряда, впервые проводились в России в 1727г., а первое описание опытов по определению сопротивления воздуха движению сферических пуль со скоростью порядка 520 м/с было выполнено англичанином Б. Робинсом в 1742 году.

Современная баллистика – научная дисциплина, построенная на использовании таких математических разделов, как интегральное и дифференциальное исчисление, решение дифференциальных уравнений. Поэтому часто говорят о вкладе в развитие баллистики ученых, непосредственно ей не занимавшихся, но разрабатывающих методы решения тех же диф. уравнений.

Среди них необходимо вспомнить таких математиков XIX века, как Карл Давид Тольме Рунге и Мартин Кутта. Предложенные ими алгоритмы решения дифференциальных уравнений (метод Рунге – Кутта) используются и в наше время.

**Далее заслушиваются доклады учащихся по теме:**

1. Отличие внутренней баллистики от внешней.

2. От чего зависит угол максимальной дальности броска?

3. Основные идеи Юрия Кондратюка.

4. Константин Эдуардович Циолковский - достижения и ошибки.

После каждого доклада необходимо обсудить основные моменты с учащимися. Учащиеся должны задать 2-3 вопроса по теме доклада.

Длительность доклада 5-7 минут. Обсуждение, вопросы – 3-5 минут.

В отчете учащиеся должны указать тему доклада, основные моменты доклада в виде тезисов (2-3 тезиса), заданные вопросы докладчику.

Докладчик в отчете должен представить реферат по теме доклада.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 10**

**Урок 34.**

Тема: «Характеристики твердого топлива».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* получить навыки расчета задач на определение момента времени, в который выдаст максимальную тягу твердотопливный двигатель, определение диаметра питающего трубопровода;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

По агрегатному состоянию топлива современные ракетные двигатели подразделяются на жидкостные и твердотопливные. Газообразные компоненты не используются ввиду их малой плотности, а гибридные системы (твердое горючее при жидком окислителе) собирают все недостатки жидкостных и твердотопливных двигателей.

Из второго закона Ньютона следует, что при уменьшении массы разгоняемого тела (выгорании топлива) его ускорение возрастает. Тяга ракетного двигателя возрастает при уменьшении давления окружающей среды. Для учета этого факта существует так называемый коэффициент пустотного приращения тяги.

Зависимость тяги от времени в случае твердотопливного двигателя определяется формой и химической структурой топливного заряда. Значит твердотопливные двигатели, в отличие от жидкостных, не позволяют изменить программу горения. Это уменьшает возможности по варьированию траекторией полета.

Для снижения механических нагрузок на конструкцию ракеты в полете имеет смысл программно снижать тягу в конце активного участка. В жидкостном двигателе этого можно добиться, снижая обороты топливных насосов и уменьшая таким образом подачу компонентов топлива в камеру сгорания.

Как можно добиться такого эффекта в случае твердотопливного двигателя? Тяга такого двигателя зависит от площади горения его заряда. При этом заряд на всем протяжении работы двигателя должен быть надежно закреплен в камере сгорания.

Уравнение неразрывности потока утверждает, что через любое полное сечение за одно и то же время проходит равный поток жидкости или газа. Гидравлическое сопротивление влияет на скорость движения жидкости. Пренебрегая им, полагаем, что скорость потока везде одинакова.

Из вышесказанного следует, что площадь сечения трубопровода должна быть равна суммарной площади сечения каналов охлаждения.

Кумулятивный заряд начинает гореть по поверхности кумулятивного углубления, находящегося в центре нижней (задней) поверхности. Указание пренебречь геометрией углубления разрешает считать, что горение начинается из точки.

На начальной стадии работы фронт горения имеет форму сферы возрастающего радиуса. Максимума площадь горения достигает в момент, когда диаметр этой сферы достигает диаметра заряда.

**Задание:** Определите момент времени, в который выдаст максимальную тягу твердотопливный двигатель с кумулятивной формой заряда диаметром 2м и длиной 8м при скорости горения топлива 0.1 м/с. Во сколько раз этот максимум превысит тягу в момент полного выгорания топлива? Геометрией кумулятивного углубления пренебречь.

**Решение:**

Кумулятивный заряд начинает гореть по поверхности кумулятивного углубления, находящегося в центре нижней (задней) поверхности. Указание пренебречь геометрией углубления разрешает считать, что горение начинается из точки.

На начальной стадии работы фронт горения имеет форму сферы возрастающего радиуса. Максимума площадь горения достигает в момент, когда диаметр этой сферы достигает диаметра заряда, т.е. через

Мы дополнительно разделили диаметр пополам, т.к. фронт горения распространяется одновременно вверх и вниз и, соответственно, должен пройти только расстояние, соответствующее радиусу.

Тяга РДТТ пропорциональна площади горения. В найденный нами момент это половина площади сферы, а в конечный момент – площадь верхнего торца заряда, т.е. площадь круга. Из соответствующих геометрических формул следует:

Таким образом, максимальная тяга превышает конечную в два раза.

**Ответ:** тяга РДТТ пропорциональна площади горения. В найденный нами момент это половина площади сферы, а в конечный момент – площадь верхнего торца заряда, т.е. площадь круга. Таким образом, максимальная тяга превышает конечную в два раза.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 11**

**Урок 38.**

Тема: «Скорость Циолковского. Потери скорости».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* получить навыки расчета задач с применением формулы скорости Циолковского;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия.**

Посмотрим, как будет выглядеть формула скорости Циолковского для ракеты. Логично предположить, что конечная скорость предыдущей ступени является начальной скоростью для следующей. Конструктора скажут, что это не совсем так, ведь в процессе разделения ступеней часть скорости может теряться. Эти потери мы учитывать не будем. В этом случае конечная скорость ракеты может быть найдена как сумма конечных скоростей ее ступеней. Естественно, удельные импульсы двигательных установок ступеней, в большинстве случаев, различны. Таким образом, мы должны были остановиться, записав верхнюю строчку.

Чтобы продвинуться дальше, определяется такое эквивалентное значение удельного импульса, которое можно было бы подставить в формулу Циолковского для каждой ступени с тем, чтобы результат суммирования не изменился. Определение такого значения мы оставим за рамками курса и рассмотрим случай, при котором удельные импульсы ступеней равны. В этом случае удельный импульс выносится за скобки, а сумма логарифмов может быть заменена логарифмом произведения.

При этом надо учитывать тот факт, что мы считаем следующую ступень частью предыдущей, что позволяет более компактно записать формулы для определения относительных конечных масс ступеней.

Условиями применимости закона сохранения импульса, на основании которого было получено уравнение Циолковского, являются отсутствие перехода кинетической энергии во внутреннюю (тепло) или потенциальную.

Самый простой и очевидный подход – записать закон сохранения механической энергии, приравняв изменение потенциальной энергии к изменению кинетической. Знак «минус» в уравнении означает, что при увеличении потенциальной энергии кинетическая уменьшается и наоборот. Отсюда можно выразить поправку. Вроде бы логично, но для нашего случая не годится. Дело в том, что это соотношение действует только для вертикального полета. В нашем случае поступим иначе.

При движении по большей части траектории вектор (mg) дает проекцию на продольную ось ракеты, направленную противоположно вектору скорости. Эта проекция представляет собой ускорение. Чтобы получить потери скорости, требуется, как сказали бы в ВУЗе, «проинтегрировать» ее по времени активного участка. Этот термин означает, что время работы двигателя нужно разделить на множество коротких интервалов и для каждого из них перемножить данную проекцию на длину интервала. Полученные произведения впоследствии складываются.

Результат, естественно, растет с течением времени. Поэтому для минимизации этой потери требуется минимизировать время разгона, т.е. задать максимально возможную тяговооруженность (отношение силы тяги двигателя к весу ракеты).

**Задание:**

*Задача 1.* Найдите скорость Циолковского для двухступенчатой ракеты со стартовой массой 200 т. Удельный импульс на первой ступени 3600 м/с, на второй – 4000 м/с. Масса топлива первой ступени 100 т, второй – 40 т. Масса конструкции первой ступени 15 т.

*Задача 2.* Оцените гравитационные потери тяги ракеты из предыдущей задачи при условии, что она поднимается вертикально, а секундный массовый расход топлива на первой ступени равен 500 кг/с, на второй - 250 кг/с.

**Решение:**

*Задача 1.* Скорость Циолковского для многоступенчатой ракеты можно найти как сумму соответствующих скоростей ее ступеней. При этом конечной массой первой ступени будет стартовая масса ракеты за вычетом массы топлива первой ступени

Соответственно относительная конечная масса первой ступени

Таким образом, скорость Циолковского для первой ступени равна

Для второй ступени стартовой массой будет масса ракеты без масс топлива и конструкции первой ступени:

Конечная масса второй ступени меньше ее начальной массы на массу топлива:

Относительная конечная масса получается равной

Скорость Циолковского для второй ступени

Соответственно для всей ракеты эти скорости складываем:

Ответ: скорость Циолковского составит 5039,29м/с.

Задача 2. Секундный массовый расход – это масса топлива, сгорающая за одну секунду. Таким образом, мы можем найти время работы каждой ступени:

Гравитационные потери определяются по формуле:

Поскольку весь подъем вертикальный, косинус тождественно равен единице и формула упрощается;

Имеющиеся в нашем распоряжении данные не позволяют корректно решить задачу, т.к. ускорение свободного падения зависит от высоты, на которой в данный момент времени находится ракета. Считая это ускорение постоянным, мы можем оценить максимум данных потерь. Для этого построим график зависимости массы ракеты от времени:

Произведение массы ракеты на время ее полета представляет собой площадь под этим графиком. Площадь под левой частью графика, соответствующей времени работы первой ступени, равна 300 т\*с. Под правой частью – 21,25 т\*с. Складывая эти значения и перемножая на 9.81, получим оценку потерь: 3151,4625 м/с.

Ответ: гравитационные потери составят 3151,4625 м/с.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 12**

**Урок 41.**

Тема: «Траектории управляемых ракет. Отличие баллистической ракеты от крылатой».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* получить навыки расчета задач на определение отклонения от цели с изменением расчетного угла;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Практически все траектории, по которым летают ракеты – криволинейные. Что значит «совершить поворот»? На рисунке слева мы видим векторы скорости тела до и после совершения маневра. Совместим начальные точки этих векторов и построим вектор, соответствующий их разности.

Именно эту скорость мы должны дополнительно сообщить ракете, чтобы развернуть ее на угол φ. Из неравенства треугольника мы знаем, что длина его стороны всегда меньше суммы длин двух оставшихся сторон, т.е. . Это неравенство и отражает потери скорости на управление траекторией.

Схема справа иллюстрирует равенство сил, действующих на ракету в вертикальном направлении. Чтобы ракета поднималась вверх, вертикальная проекция силы тяги двигателя должна быть больше веса ракеты. Таким образом, наклонный старт требовал тяги, в разы превышающей вес ракеты.

Чем крылатая ракета отличается от самолета?

Отличие сформулировать не так просто. Оно не в том, что на самолете есть пилот, а на ракете его нет. Самолеты японских «Камикадзе» по сути – крылатые ракеты. Разница в том, что крылатая ракета предназначена для единственного полета. При этом летит она как самолет. В чем главное отличие крылатой ракеты от баллистической?

Главное отличие не наличие или отсутствие крыльев, а наличие у траектории баллистической ракеты пассивного участка, на котором она практически неуправляема и движется как свободно брошенное тело. Крылатая ракета управляется на всей своей траектории.

Тем не менее, подавляющее большинство крылатых ракет имеют аэродинамические плоскости, что позволяет, за счет аэродинамической подъемной силы, уменьшить тягу двигателя и, соответственно, расход топлива.

Поскольку крылатая ракета легче баллистической, она имеет более широкие возможности запуска и базирования.

Мы уже говорили, что большинство крылатых ракет используют аэродинамическую подъемную силу. Для этого их траектория должна располагаться в плотных слоях атмосферы. При этом резко возрастают аэродинамические потери.

**Задание:**

*Задача 1.* Определите потери скорости на управление при полете со скоростью 1 км/с по траектории, представляющей собой дугу в окружности.

*Задача 2.* Двигатель баллистической ракеты выключается при достижении ею скорости 3 км/с на высоте 25 км. Расчетный конечный угол равен 30°. К какому отклонению от цели приведет изменение угла в пределах ±0.5°?

**Решение:**

*Задача 1.*

45°

1 км/с

1 км/с

Поскольку модуль скорости остается постоянным, потери связаны только с поворотом на центральный угол, стягивающий дугу в окружности. Это угол 45°. Таким образом, нам требуется найти основание равнобедренного треугольника, с верхним углом 45°.

В данном случае применяем теорему косинусов:

Соответственно получаем:

Ответ: потери скорости составят 0,765 м/с.

*Задача 2.* Для решения этой задачи требуется найти дальности полета тела, брошенного под углом к горизонту 29.5° и 30.5° на высоте 25000 м. Разность этих значений и даст требуемое отклонение.

Найдем время пассивного полета ракеты до вершины траектории. Вертикальная составляющая конечной скорости равна

Соответственно время равнозамедленного движения до остановки

Высота, до которой поднимется ракета, равна

Время падения тела с такой высоты составит

Таким образом, общее время полета составит

Горизонтальная составляющая конечной скорости равна

Дальность полета в параболической постановке

Ответ: отклонение от цели составит 1756127 м.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 13**

**Урок 45.**

Тема: «Траектории космических объектов. Законы Кеплера».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* получить навыки расчета задач на определение продолжительности перелета по эллиптической траектории;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Пытаясь свести сложное петлеобразное движение к равномерному движению по окружности, Клавдий Птолемей ввел так называемые «эпициклы» - дополнительные окружности, по которым двигались планеты, и центры которых, в свою очередь, равномерно двигались по окружности вокруг Земли. Поскольку впоследствии обнаружились расхождения наблюдений с исходной моделью, стали вводить дополнительные окружности. В итоге разобраться в этой «матрешке» стало очень сложно.

Естественно в средние века возникло стремление упростить эту систему. Удачный вариант был предложен Николаем Коперником. Церковь не успела с ним «поквитаться», т.к. отпечатанный экземпляр его книги был вложен в руки умирающему автору.

Коперник взял за центральное тело Солнце, а петли объяснил взаимным движением Земли и соответствующей планеты, исходя из принципа «чем ближе планета к Солнцу, тем быстрее она движется». При этом планеты, находящиеся у Птолемея внутри орбиты Солнца, у Коперника оказались внутри орбиты Земли.

И описание Птолемея, и описание Коперника содержали общие черты. И там, и там мы видим сферу неподвижных звезд. И один, и второй полагали, что «центр мироздания» находится внутри планетной системы. Только Птолемей считал этим центром Землю, а Коперник – Солнце. Орбиты планет у обоих были круговыми, а движение планет – равномерным.

Принципиально иной подход был предложен в средине XVII века Иоганном Кеплером. Он, как и его предшественники, оставил «за скобками» причины такого движения, предоставив их «воле Господа». Но при этом его описание кардинально отличалось от предшественников.

Кеплер изменил саму форму орбит планет, утверждая, что это не окружности, а эллипсы.

Двумя крайними случаями эллипса являются окружность, для которой эти фокусы совпадают, и отрезок, для которых упоминаемая сумма равна расстоянию между фокусами. Для более удобного описания эллипса введено понятие «эксцентриситет». Если две полуоси равны друг другу (a = b), то эллипс превращается в окружность, а эксцентриситет становится равен нулю. При равенстве нулю меньшей полуоси (b = 0) эксцентриситет равен единице, а эллипс превращается в прямолинейный отрезок.

Согласно первому закону Кеплера именно эллипс является формой орбит планет. При этом Солнце находится не в геометрическом центре эллипса, а в одном из его фокусов.

Закон сохранения энергии, как мы знаем его сейчас, во времена Кеплера был еще неизвестен. Поэтому о том, каким образом он пришел к формулировке своего второго закона, можно только предполагать. С современных позиций удаление планеты от Солнца должно приводить к росту потенциальной энергии. Значит кинетическая энергия и ее мерило – скорость, должны при этом уменьшаться. Кеплер выразил эту зависимость графически.

Самым сложным для объяснения и понимания является Третий закон Кеплера. Он устанавливает зависимость между периодами обращения планет и размерами их орбит. Кеплер сформулировал его следующим образом: квадраты периодов обращения планет соотносятся как кубы больших полуосей их орбит. Таким образом, скорость движения планеты в каждой точке ее орбиты не может принимать случайные значения. Она строго определена формой орбиты.

Исаак Ньютон внес в это определение еще и массу центрального тела (Солнца). При этом он доказал, что от массы самой планеты эта скорость не зависит.

Подытоживая вышесказанное нужно отметить главные отличия системы Кеплера от взглядов его предшественников:

1. Орбиты планет не являются круговыми.
2. Скорости движения планет не постоянны.
3. Скорость планеты в каждой точке напрямую связана с геометрией орбиты.

При этом законам Кеплера, в качестве частного случая, соответствует и равномерное движение планеты по окружности.

**Задание:**

*Задача 1.* Продолжительность года на Венере – 225 земных суток, на Земле – 365 земных суток. Считая орбиты планет круговыми, найдите продолжительность перелета по эллиптической траектории с орбиты Земли на орбиту Венеры.

*Задача 2.* Продолжительность года на Марсе – 687 земных суток, на Земле – 365 земных суток. Считая орбиты планет круговыми, найдите продолжительность перелета по эллиптической траектории с орбиты Земли на орбиту Марса.

**Решение:**

*Задача 1.* Согласно третьему закону Кеплера, кубы больших полуосей орбит соотносятся так же, как квадраты периодов обращения планет. В случае круговых орбит длины больших полуосей равны радиусам орбит. Принимая радиус Земной орбиты за «х», выразим радиус орбиты Венеры:

Большая полуось траектории перелета составляет их полусумму:

Период обращения по такой орбите составит

Перелет займет половину этого периода, т.е. 175.5 дня.

Ответ: перелет по эллиптической траектории составит 175,5 дня.

*Задача 2.* Согласно третьему закону Кеплера, кубы больших полуосей орбит соотносятся так же, как квадраты периодов обращения планет. В случае круговых орбит длины больших полуосей равны радиусам орбит. Принимая радиус Земной орбиты за «х», выразим радиус орбиты Марса:

Большая полуось траектории перелета составляет их полусумму:

Период обращения по такой орбите составит

Перелет займет половину этого периода, т.е. 205 дней.

Ответ: перелет по эллиптической траектории составит 205 дней.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

**Практическая работа № 14**

**Урок 49.**

Тема: «Межорбитальные переходы».

**Количество часов:**1 академический час (45 мин.).

**Цель работы:**

* получить навыки расчета задач на определение запаса топлива разгонного блока при переводе спутника на разные высоты, потребных приращений скорости для осуществления двухимпульсного перехода на геостационарную орбиту с круговой орбиты;
* сформировать навыки анализа научно-технической информации.

**Ход практического занятия:**

Согласно первому закону Ньютона, тело сохраняет положение покоя или прямолинейного равномерного движения, если на него не действуют силы или действие этих сил скомпенсировано.

В сторону Земли направлено ускорение, которое мы привыкли именовать ускорением свободного падения. Только это не привычные нам 9.8 м/с2, а значение, определяемое из закона всемирного тяготения.Для этого постоянную всемирного тяготения перемножаем на массу Земли и делим на квадрат радиуса орбиты спутника. Приведенное значение справедливо только для нулевой высоты.

Орбитальная скорость на круговой орбите уменьшается с ростом ее радиуса. При этом длина участка выведения также уменьшается.

Одной из характеристик орбиты является наклонение. Это угол между плоскостью экватора и плоскостью орбиты. Минимальный угол наклонения реализуется при запуске вдоль параллели и равен широте точки старта.

«Гомановская» траектория – по фамилии впервые предложившего ее еще в 1925 году Вальтера Гомана. Эта траектория требует минимального запаса топлива. Ее используют, когда нет жесткого лимита по времени перехода.

По потребному количеству включений двигателя разгонного блока существуют две простейшие схемы выведения - «двухимпульсная» и «трехимпульсная». Обе начинаются с того, что ракета-носитель выводит спутник с разгонным блоком на низкую опорную орбиту.

Как мы уже говорили, спутник на ГСО с Земли виден как висящий над определенной точкой экватора. Поэтому «вывести спутник на геостационарную орбиту» означает не только «поднять его на 36 000 км над экватором», но и установить над заданной точкой. Таких точек стояния на данной орбите сотни, а возможных мест старта ракет-носителей – единицы.

Была рассчитана «типовая», общая для всех точек, траектория выведения. Для доставки в нужную точку и служит низкая опорная орбита. Это – «комната ожидания», в которой спутник с разгонным блоком ждут, пока Земля под ними развернется таким образом, чтобы доставленный на ГСО спутник располагался над назначенной для него точкой стояния.

В случае двухимпульсной схемы такая «точка минимальной скорости» находится на самой геостационарной орбите. Поэтому на опорной орбите спутник получает приращение скорости Δv1, которое отправляет его на эллиптическую орбиту с апогеем на ГСО. В апогее выдается второй разгоняюще-корректирующий импульс, поднимающий перигей на ГСО и изменяющий плоскость орбиты. К преимуществам этой схемы можно отнести тот факт, что время выведения спутника по ней – минимально.

Энергетически более выгодной является трехимпульсная схема. Первый этап вывода по ней повторяет двухимпульсную с той разницей, что первый импульс поднимает орбиту в 2 – 3 раза выше ГСО. В этой наиболее удаленной точке выдается второй импульс, изменяющий плоскость орбиты и поднимающий перигей на высоту ГСО. Третий импульс в этой схеме – тормозящий. Он нужен чтобы опустить апогей до уровня ГСО.

**Задание:**

*Задача 1.* Какой запас топлива должен иметь разгонный блок, чтобы перевести спутник массой 2 тонны с круговой орбиты высотой 250 км на круговую орбиту высотой 400 км по гомановской траектории? Сухая масса разгонного блока 500 кг, масса Земли 5,97\*1024 кг, радиус Земли 6371 км, удельный импульс двигательной установки 3500 м/с.

*Задача 2.* Рассчитать потребные приращения скорости для осуществления двухимпульсного перехода на геостационарную орбиту с круговой орбиты высотой 250 км и наклонением 56º.

**Решение:**

*Задача 1.* Межорбитальный переход потребует двойного включения двигателя. При этом масса выводимого объекта при втором включении будет меньше, чем при первом. Рассчитать потребные изменения скорости можно по формулам

,.

Подставляя данные, получим:

Осталось рассчитать потребное изменение массы. Для упрощения расчетов не будем учитывать время работы двигательной установки. Задача превращается в определение массы тела, которое необходимо отбросить от тела массой 2500 кг со скоростью 3500 м/с, чтобы получить скорость .

На основании закона сохранения импульса запишем:

Откуда получаем массу топлива, израсходованного на второе включение двигателя:

Знак минус означает, что масса аппарата в процессе работы двигателя уменьшилась. Полученную массу топлива мы должны прибавить к выводимой массе прежде, чем будем определять расход топлива на первое включение двигателя:

Складывая полученные массы, находим израсходованный запас:

Ответ: разгонный блок должен иметь запас топлива 62,08 кг.

*Задача 2.* Данная задача решается в три этапа:

1. Определение радиуса геостационарной орбиты.
2. Расчет приращения скоростей для компланарного перехода между базовой орбитой и орбитой с радиусом ГСО.
3. Расчет приращения скорости на некомпланарный переход на высоте ГСО.

Радиус геостационарной орбиты определяется из уравнения равновесия спутника. В данном случае приравняем центростремительное и гравитационное ускорения:

С другой стороны, эта скорость должна обеспечивать совершение полного оборота за сутки:

Приравняв правые части этих уравнений, получим значение радиуса геостационарной орбиты:

После подстановки данных, получаем:

Используя формулы из предыдущей задачи, получаем:

;

;

Осталось рассчитать приращение скорости на некомпланарный переход. Поскольку орбиты этого перехода отличаются только плоскостями, соответствующее приращение скорости является основанием равнобедренного треугольника, боковые стороны которого – векторы скорости на ГСО. Зная ее радиус, определяем потребную скорость:

Теперь, по теореме косинусов определяем последнее приращение скорости:

Ответ: приращения скорости для осуществления двухимпульсного перехода на геостационарную орбиту с круговой орбиты составит 2882,56 м/с.

Список оборудования, для проведения занятия:

* персональный компьютер;
* экран;
* проектор;
* красная лазерная указка.

# **Список литературы**

## Основная литература

1. Мхитарян, А.М. Аэродинамика/ А.М. Мхитарян. - ЭКОЛИТ, 2012.
2. Бережко Е.Г. Введение в физику космоса/ Е.Г. Бережко. - ФИЗМАТЛИТ, 2014.
3. Хомич Е.О. Космос/ Е.О. Хомич. - АСТ, 2016.
4. Авдеев Ю.Ф. Космос, баллистика, человек/ Ю.Ф.Авдеев. - Высшая школа, 2013.
5. Граве И.П. Внутренняя баллистика. Пиродинамика/ И.П. Граве. - 2014.
6. Дэвис Л., Внешняя баллистика ракет / Л.Девис, Дж. Фоллин, Л. Блитцер. - Воениздат, 2000.

## Дополнительная литература

1. Зоншайн, С.И. Аэродинамика и конструкция летательных аппаратов/ С.И. Зонштайн. - Высшая школа, 1988.
2. Лысенко, Л.Н. Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов/ Л.Н. Лысенко, В.В. Бетанов, Ф.В. Звягин. – МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
3. Уимпресс, Р.Н. Внутренняя баллистика пороховых ракет/ Р.Н. Уимпресс. – Издательство иностранной литературы, 2012.
4. Карафоли, Е. Аэродинамика крыла самолета/ Е.Карафоли – АН СССР, 1991.

***Интернет ресурсы***

1. Возникновение и развитие аэродинамики как науки. URL: [https://students-library.com/library/](https://students-library.com/library/read/107990-vozniknovenie-i-razvitie-aerodinamiki-kak-nauki)
2. Основные законы аэродинамики. URL: [http://deltaplan.kz/](http://deltaplan.kz/content/101-osnovnyie_zakonyi_aerodinamiki)
3. Космическая баллистика. URL: [https://zen.yandex.ru/](https://zen.yandex.ru/media/id/5e5fa3330ef63326e13d4601/chto-takoe-kosmicheskaia-ballistika-5e8101a299b22b079189285c)
4. Баллистико-навигационное обеспечение. URL: [https://studopedia.net/](https://studopedia.net/1_21991_ponyatie-ballistiko-navigatsionnogo-obespecheniya.html)