

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Директор физтех-школы**  
**аэрокосмических технологий**  
**С.С. Негодяев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Управление спуском
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра аэрофизической механики и управления движением
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Н.Е. Зубов, д-р техн. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедре аэрофизической механики и управления движением 06.04.2020

## Аннотация

Изучение учебной дисциплины направлено на углубление и расширение базовой профессиональной подготовки магистранта, формирование соответствующих компетенций.

В учебной дисциплине рассматриваются основные теоретические понятия, концепции и подходы по основам управления спуском. Студенты знакомятся с используемыми в теории управления спуском математическими методами, постановкой задачи управления движением, выводом уравнений движения центра масс и вокруг центра масс на спуске, приближенными решениями уравнений и часто используемыми формулами. Студенты научатся решать задачи, связанные с управлением на спуске как разделом механики.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по основам управления спуском (включая знакомство с используемыми в теории управления спуском математическими методами, постановкой задачи управления движением, выводом уравнений движения центра масс и вокруг центра масс на спуске, приближенными решениями уравнений и часто используемыми формулами) для использования в области разработки и эксплуатации систем управления движением и навигации космических аппаратов.

#### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания в области физико-математических основ движения в атмосфере планет при спуске;
- показать на примерах многообразие задач, связанных с управлением на спуске как разделом механики.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- используемую в теории управления на спуске терминологию;
- физический смысл измеряемых инерциальными датчиками величин на участке спуска;
- возможности различных методов управления на спуске;
- точные и приближенные уравнения движения при движении в атмосфере планет;
- современные методы управления движением на участке спуска.

уметь:

- видеть в задачах, связанных с управлением движением на спуске, физическое содержание;
- осваивать новые теоретические подходы в задачах управления движением в атмосфере;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и математического моделирования и эксперимента.

владеть:

- культурой математической постановки задач, связанных с задачами управления на спуске;
- базовыми навыками работы с методами модального и оптимального управления;
- методами вывода уравнений движения в атмосфере планет;
- навыками самостоятельной работы с научной литературой по проблемам управления в атмосфере планет.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Общие вопросы управления движением космического аппарата при входе в атмосферу		4		5
2	Оптимальный маневр торможения на орбите		4		6
3	Уравнения движения космического аппарата при входе в атмосферу		6		2
4	Траектории входа в атмосферу		4		5
5	Управление космическим аппаратом при входе в атмосферу		7		2
6	Управление угловым движением космического аппарата при входе и полете в атмосфере		2		5
7	Особенности управления движением центра масс и угловым движением спускаемого аппарата типа «Союз» при возвращении с орбиты земли		3		5
Итого часов			30		30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Общие вопросы управления движением космического аппарата при входе в атмосферу

###### 1.1 Некоторые проблемы, связанные с входом в атмосферу

###### 1.2. Общие вопросы динамики КА при входе в атмосферу

###### 1.2.1. Модель гравитационного поля

###### 1.2.2. Модель атмосферы

- 1.3.Аэродинамические силы и моменты
- 1.4.Приближенные формулы расчета тепловых потоков
2. Оптимальный маневр торможения на орбите
  - 2.1. Постановка задачи оптимизации
  - 2.2. Оптимальная ориентация тормозного импульса
    - 2.2.1. Торможение в апоцентре или перицентре эллиптической орбиты
    - 2.2.2.Тормозной маневр на круговой орбите
    - 2.2.3. Свойства оптимального маневра спуска с орбиты
  - 2.3.Оптимальная высота круговой орбиты для маневра спуска
3. Уравнения движения космического аппарата при входе в атмосферу
  - 3.1.Уравнения движения космического аппарата при входе в атмосферу без учета вращения Земли
  - 3.2. Уравнения движения космического аппарата при входе в атмосферу с учетом вращения Земли
  - 3.3.Вывод приближенного уравнения движения
4. Траектории входа в атмосферу
  - 4.1.Баллистические траектории входа в атмосферу
  - 4.2.Траектории входа в атмосферу КА с подъемной силой
  - 4.3.Траектории входа в атмосферу Земли КА со скоростями большими круговой скорости
5. Управление космическим аппаратом при входе в атмосферу
  - 5.1. Основные задачи управления траекторией входа в атмосферу и возмущения действующие на КА
  - 5.2. Оценка устойчивости неуправляемого движения в атмосфере.
  - 5.3. Способы управление траекториями входа
  - 5.4. Классификация систем управления
  - 5.5.Системы продольного управления, основанные на отслеживании номинальных программ
  - 5.6.Определение информации необходимой для управления продольным движением
  - 5.7.Системы продольного управления, основанные на отслеживании номинальных программ с применением метода точного размещения полюсов
    - 5.7.1. Размещение полюсов
    - 5.7.2.Управление продольным движением КА в атмосфере с использованием метода точного размещения полюсов
  - 5.8.Системы пространственного управления, основанные на отслеживании номинальных программ с применением метода точного размещения полюсов
  - 5.9.Управление траекторией с использованием функций влияния.
  - 5.10.Алгоритмы управления, основанные на прогнозировании траекторий
    - 5.10.1.Постановка задачи
    - 5.10.2.Терминальный алгоритм управления продольным движением спускаемого аппарата с ограничением перегрузки
6. Управление угловым движением космического аппарата при входе и полете в атмосфере
  - 6.1.Стабилизация движения космического аппарата относительно центра масс
    - 6.1.1.Постановка задачи и методы решения
    - 6.1.2.Уравнения пространственного движения относительно центра масс
    - 6.1.3. Управление движением по тангажу, рысканию и крену

7. Особенности управления движением центра масс и угловым движением спускаемого аппарата типа «Союз» при возвращении с орбиты земли

7.1. Особенности управления движением центра масс и угловым движением спускаемого аппарата типа «Союз» при возвращении с орбиты земли

7.2 Особенности управления движением центра масс

7.3. Особенности управления угловым движением

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория, компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, звуковая система).

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### Основная литература

1. Маневрирование космических аппаратов [Текст]/К. Б. Алексеев, Г. Г. Бебенин, В. А. Ярошевский, -М., Машиностроение, 1970
1. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г. Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. М., «Наука», 1975.
2. Ярошевский В.Я. Вход в атмосферу космических летательных аппаратов. М.: Наука. 1988г.
3. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2011г.
4. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Синтез развязывающих законов стабилизации орбитальной ориентации космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 1.
5. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н. Модификация метода точного размещения полюсов и его применение в задачах управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 2. с.118-132
6. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н. и др. Применение метода точного размещения полюсов к решению задач наблюдения и идентификации // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 1. С. 135–151.

### Дополнительная литература

1. Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу [Точка]/Д. Е. Охоцимский, Ю. Ф. Голубев, Ю. Г. Сихарулидзе, -М., Наука, 1975
1. Евдокимов С.Н., Климанов С.И., Корчагин А.Н., Микрин Е.А., Сихарулидзе Ю.Г. Терминальный алгоритм управления продольным движением спускаемого аппарата с ограничением перегрузки// Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 5. С. 102–118.
2. Евдокимов С.Н., Климанов С.И., Комарова Л.И., Микрин Е.А. Управление угловым движением спускаемым аппаратом типа «Союз» при возвращении с орбиты спутника Земли// Изв. РАН. ТиСУ. 2011. № 5. С. 134–143.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. <http://urss.ru> – сайт научного издательства (издательской группы) URSS.
2. <http://mtt.ipmnet.ru> – сайт журнала «Известия РАН. Теория и системы управления».
3. <http://pinhe.lebedev.ru> – сайт журнала «Физическое образование в вузах».
4. [http://www.space\\_lab.ru](http://www.space_lab.ru) – сайт научных конференций «Physical Interpretations of Relativity Theory».
5. <http://acanud.ru> – сайт международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

пакеты офисного программного обеспечения Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), OpenOffice.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Успешное освоение спецкурса «Управление спуском» требует систематических занятий и большой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- знакомство (по полученным раздаточным материалам) с содержанием всего курса и с рекомендованной учебно-научной литературой,
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенные для самостоятельного изучения.

Текущий контроль за самостоятельной работой студентов осуществляется в форме устного опроса на занятиях. Приём экзамена проводится в два этапа. После первого этапа озвучиваются оценки, полученные слушателями по результатам ответов на два вопроса. Желающим повысить оценку предлагается дополнительно подготовиться и быть готовым к ответу на три-четыре вопроса.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии Физтех-школа Аэрокосмических Технологий кафедра аэрофизической механики и управления движением
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	Н.Е. Зубов, д-р техн. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Управление спуском» обучающийся должен:

### знать:

- используемую в теории управления на спуске терминологию;
- физический смысл измеряемых инерциальными датчиками величин на участке спуска;
- возможности различных методов управления на спуске;
- точные и приближенные уравнения движения при движении в атмосфере планет;
- современные методы управления движением на участке спуска.

### уметь:

- видеть в задачах, связанных с управлением движением на спуске, физическое содержание;
- осваивать новые теоретические подходы в задачах управления движением в атмосфере;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и математического моделирования и эксперимента.

### владеть:

- культурой математической постановки задач, связанных с задачами управления на спуске;
- базовыми навыками работы с методами модального и оптимального управления;
- методами вывода уравнений движения в атмосфере планет;
- навыками самостоятельной работы с научной литературой по проблемам управления в атмосфере планет.

## 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Текущий контроль осуществляется в форме устного опроса на занятиях.

## 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Примеры экзаменационных билетов:

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

- 1.Некоторые проблемы, связанные с входом в атмосферу.
- 2.Особенности управления угловым движением спускаемого аппарата «Союз-ТМА».



#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

1. Общие вопросы динамики КА при входе в атмосферу (модель гравитационного поля Земли, модель атмосферы).
2. Особенности управления движением центра масс спускаемого аппарата «Союз-ТМА».

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

1. Аэродинамические силы и моменты на участке спуска.
2. Стабилизация движения космического аппарата относительно центра масс при спуске.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

1. Приближенные формулы расчета тепловых потоков.
2. Уравнения пространственного движения относительно центра масс.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

1. Постановка задачи оптимизации маневра торможения на орбите
2. Управление движением по тангажу, рысканию и крену относительно центра масс при спуске

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 6

1. Оптимальная ориентация тормозного импульса.
2. Терминальный алгоритм управления продольным движением спускаемого аппарата с ограничением перегрузки.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 7

1. Свойства оптимального маневра спуска с орбиты.
2. Алгоритмы управления, основанные на прогнозировании траекторий постановка задачи.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 8

1. Уравнения движения космического аппарата при входе в атмосферу без учета вращения Земли.
2. Управление траекторией с использованием функций влияния.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 9

1. Уравнения движения космического аппарата при входе в атмосферу с учетом вращения Земли.
2. Системы пространственного управления, основанные на отслеживании номинальных программ с применением метода точного размещения полюсов.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 10

1. Вывод приближенного уравнения движения центра масс.
2. Управление продольным движением КА в атмосфере с использованием метода точного размещения полюсов. Решение задачи идентификации возмущения в продольном канале.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 11

1. Баллистические траектории входа в атмосферу.
2. Способы управления траекториями входа, классификация систем управления.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 12

1. Оценка устойчивости неуправляемого движения в атмосфере.
2. Траектории входа в атмосферу КА с подъемной силой.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 13

1. Тормозной маневр на круговой орбите.

## 2. Основные задачи управления траекторией входа в атмосферу и возмущения, действующие на КА

### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 14

1. Тормозной маневр на эллиптической орбите

2. Траектории входа в атмосферу Земли КА со скоростями большими круговой скорости

#### Критерии оценивания

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;

оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;

оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;

оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал, что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Ознакомление студентов с перечнем выносимых на экзамен билетов проводится за неделю до консультации.

Порядок проведения экзамена.

Экзамен проводится в форме опроса. Студенту предоставляется пятнадцать-двадцать минут для монолога у доски с мелом в руках, после чего экзаменатор делает при необходимости комментарии, оценивает ответ. Затем другой студент отвечает на свой первый вопрос. По завершении первого круга студенты в том же порядке отвечают на вторые вопросы. При ответе обучающегося на вопрос он не может пользоваться конспектами лекций и литературой.