

**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.

**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>	1
<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.