

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
прикладной математики и  
информатики**

**А.М. Райгородский**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Избранные главы механики космического полета
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Космические технологии
	Физтех-школа Аэрокосмических Технологий
	кафедра математического моделирования и прикладной математики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составили:

С.П. Трофимов, канд. физ.-мат. наук, ассистент

А.А. Целоусова, ассистент

Программа обсуждена на заседании кафедры математического моделирования и прикладной математики  
01.04.2024

## Аннотация

Курс "Избранные главы механики космического полета" посвящен теории отбitalного движения тел. В ходе освоения курса подробно излагаются знания в области оптимального управления движением космических аппаратов в одиночном и групповом полете, описываются принципы и математических методов проектирования и оптимизации межпланетных траекторий, в том числе с использованием динамических эффектов задачи трех тел, рассматриваются базовыми сведениями о перспективных технологиях бестопливного управления движением космических аппаратов и их применении в задачах орбитальной механики.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- ознакомление студентов с основными направлениями современных исследований в механике космического полета и полученными по этим направлениям результатами.

#### Задачи дисциплины

- приобретение углубленных знаний в области оптимального управления движением космических аппаратов в одиночном и групповом полете;
- освоение принципов и математических методов проектирования и оптимизации межпланетных траекторий, в том числе с использованием динамических эффектов задачи трех тел;
- знакомство с базовыми сведениями о перспективных технологиях бестопливного управления движением космических аппаратов и их применении в задачах орбитальной механики.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории в области оптимального управления орбитальным движением космических аппаратов в одиночном и групповом полете;
- принципы и математические методы проектирования и оптимизации межпланетных траекторий, в том числе с использованием динамических эффектов задачи трех тел;
- базовые сведения о технологиях бестопливного управления движением космических аппаратов и их применении в задачах орбитальной механики.

уметь:

- получать оптимальные законы управления орбитальным движением космических аппаратов с двигателями большой и малой тяги;
- моделировать относительное движение космических аппаратов в групповом полете;
- разрабатывать алгоритмы импульсного и непрерывного поддержания спутниковых конфигураций;
- проектировать оптимальные траектории к небесным телам Солнечной системы, в том числе с использованием динамических эффектов задачи трех тел;
- моделировать движение космических аппаратов, оснащенных солнечным парусом или электродинамическим тросом.

владеть:

- техникой постановки и решения оптимизационных задач механики космического полета;
- навыками моделирования управляемого движения космических аппаратов с использованием программных средств MATLAB®;
- культурой поиска и обработки актуальной научной информации (статей, книг) на русском и английском языках в сети Интернет.

#### 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	Бестопливные способы управления орбитальным движением космических аппаратов.	4			12
2	Оптимальное управление орбитальным движением космических аппаратов.	8			12
3	Относительное движение космических аппаратов.	6			12
4	Проектирование и оптимизация межпланетных траекторий.	6			12
5	Регулярная и хаотическая динамика в ограниченной задаче трех тел.	6			12
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

###### 1. Бестопливные способы управления орбитальным движением космических аппаратов.

Концепции солнечного паруса и светоотражающего баллона. Эволюция орбиты спутника с большой парусностью. Применение паруса/баллона для увода спутников с орбиты. Применение солнечного паруса в межпланетных перелетах. Некеплеровы орбиты. Миссия «Полярный смотритель» ("Pole-sitter").

Концепции электродинамического и электростатического тросов, их применение в задаче увода спутников с орбиты.

## 2. Оптимальное управление орбитальным движением космических аппаратов.

Необходимые условия оптимальности импульсных маневров. Понятие базис-вектора (primer vector). Геометрическая интерпретация необходимых условий оптимальности. Решение задачи перелета между близкими компланарными околокруговыми орбитами.

Типы двигателей малой тяги: идеально регулируемый, с постоянной скоростью истечения. Различные постановки оптимизационной задачи. Метод продолжения по параметру (гомотопии) для решения получающихся из необходимых условий оптимальности краевых задач.

Необходимые условия оптимальности при наличии ограничений на направление вектора тяги. Понятие одноосного управления (single-input control). Оптимальная одноосная коррекция плоскости орбиты.

## 3. Относительное движение космических аппаратов.

Концепция группового полета (formation flying). Типы спутниковых формаций: созвездия (constellations), кластеры (clusters), рои (swarms). Нелинейные уравнения относительного движения в декартовых координатах и орбитальных элементах. Линеаризованные уравнения Хилла-Клоэсси-Уилтшира (Hill-Clohessy-Wiltshire) и Шонера-Хемпеля (Tschauner-Hempel).

Поддержание спутниковых конфигураций с помощью непрерывного или дискретного управления. Управление на основе функций Ляпунова. Линейно-квадратичный регулятор. Двухимпульсные маневры поддержания и реконфигурации формации. Ошибки исполнения маневров, способы их учета и уменьшения.

## 4. Проектирование и оптимизация межпланетных траекторий.

Модель сопряженных конических сечений. Активные и пассивные гравитационные маневры. Маневры в глубоком космосе (deep space maneuvers). Резонансные траектории. Граф Тиссерана.

Низкоэнергетические перелеты к Луне в бикруговой задаче четырех тел. Баллистический захват. Межпланетная транспортная сеть (interplanetary transport network). Резонансные сближения. Граф Тиссерана-Пуанкаре.

## 5. Регулярная и хаотическая динамика в ограниченной задаче трех тел.

Линеаризованные уравнения движения в окрестности коллинеарных точек либрации. Горизонтальные и вертикальные орбиты Ляпунова. Гало-орбиты. Квазипериодические орбиты. Инвариантные многообразия. Асимптотические и транзитные орбиты. Гомоклинические и гетероклинические траектории.

Уравнения движения в задаче Хилла. Двукратно осредненная задача Хилла. Механизм Лидова-Козаи. Замороженные орбиты (frozen orbits).

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

Необходимое оборудование для лекций: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, маркерная доска, связь с Интернетом).

Необходимое программное обеспечение: программный пакет MATLAB®.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Bruce Conway (ed.), *Spacecraft Trajectory Optimization*, Cambridge Aerospace Series, Cambridge University Press, 2010. Электронная версия книги доступна для личного пользования студентами в ИПМ РАН.
2. Kyle Alfriend, Srinivas Rao Vadali, Pini Gurfil, Jonathan How, Louis Breger, *Spacecraft Formation Flying. Dynamics, control and navigation*, Elsevier Astrodynamics Series, Butterworth-Heinemann, 2009. Электронная версия книги доступна для личного пользования студентами в ИПМ РАН.
3. Wang Sang Koon, Martin Lo, Jerrold Marsden, Shane Ross, *Dynamical Systems: The Three-Body Problem and Space Mission Design*, Springer-Verlag New York, 2011. Электронная версия книги доступна по ссылке [http://www.cds.caltech.edu/~koon/book/KoLoMaRo\\_DMissionBk.pdf](http://www.cds.caltech.edu/~koon/book/KoLoMaRo_DMissionBk.pdf)
4. Stephen Kemble, *Interplanetary Mission Analysis and Design*, Springer Praxis Books/Astronautical Engineering Series, Springer, 2006. Электронная версия книги доступна для личного пользования студентами в ИПМ РАН.

#### Дополнительная литература

1. Ильин В.А., Кузмак Г.Е. *Оптимальные перелеты космических аппаратов*. – М.: Наука, 1976.
2. Лоуден Д.Ф. *Оптимальные траектории для космической навигации*. – М.: Мир, 1966.
3. Белецкий В.В. *Очерки о движении космических тел*. Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Издательство ЛКИ, 2009.
4. Gerard Gómez, Jaume Llibre, Regina Martínez, Carles Simó, *Dynamics and Mission Design Near Libration Points, Volume I Fundamentals: The Case of Collinear Libration Points*, World Scientific Monograph Series in Mathematics, World Scientific Publishing, 2001.
5. Gerard Gómez, Àngel Jorba, Josep Masdemont, Carles Simó, *Dynamics and Mission Design Near Libration Points, Volume III Advanced Methods for Collinear Points*, World Scientific Monograph Series in Mathematics, World Scientific Publishing, 2001.
6. Colin R. McInnes, *Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications*, Springer Praxis Books/Astronomy and Planetary Sciences Series, Springer, 2004.
7. Giovanni Vulpatti, Les Johnson, Gregory Matloff, *Solar Sails: A Novel Approach to Interplanetary Travel*, Copernicus, 2008.
8. Mario Cosmo, Enrico Lorenzini, *Tethers in Space Handbook*, 3rd ed., NASA Marshall Space Flight Center, 1997.

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

<http://www.keldysh.ru>

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

Необходимое программное обеспечение: программный пакет MATLAB®.

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

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- выполнение лабораторных работ, для осознание связей между теорией и практическими навыками;
- подготовку к дифференцированному зачёту.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Космические технологии  
Физтех-школа Аэрокосмических Технологий  
кафедра математического моделирования и прикладной математики  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчики:**

С.П. Трофимов, канд. физ.-мат. наук, ассистент

А.А. Целоусова, ассистент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Избранные главы механики космического полета» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории в области оптимального управления орбитальным движением космических аппаратов в одиночном и групповом полете;
- принципы и математические методы проектирования и оптимизации межпланетных траекторий, в том числе с использованием динамических эффектов задачи трех тел;
- базовые сведения о технологиях бестопливного управления движением космических аппаратов и их применении в задачах орбитальной механики.

### уметь:

- получать оптимальные законы управления орбитальным движением космических аппаратов с двигателями большой и малой тяги;
- моделировать относительное движение космических аппаратов в групповом полете;
- разрабатывать алгоритмы импульсного и непрерывного поддержания спутниковых конфигураций;
- проектировать оптимальные траектории к небесным телам Солнечной системы, в том числе с использованием динамических эффектов задачи трех тел;
- моделировать движение космических аппаратов, оснащенных солнечным парусом или электродинамическим тросом.

### владеть:

- техникой постановки и решения оптимизационных задач механики космического полета;
- навыками моделирования управляемого движения космических аппаратов с использованием программных средств MATLAB®;
- культурой поиска и обработки актуальной научной информации (статей, книг) на русском и английском языках в сети Интернет.

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

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

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

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачёта:

1. Необходимые условия оптимальности импульсных маневров. Понятие базис-вектора.
2. Геометрическая интерпретация условий оптимальности импульсных маневров.
3. Типы двигателей малой тяги. Различные постановки оптимизационной задачи.
4. Метод продолжения по параметру. Дифференциальное уравнение метода продолжения.

5. Необходимые условия оптимальности при наличии ограничений на направление тяги.
6. Типы спутниковых формаций. Нелинейные уравнения относительного движения.
7. Линеаризованные уравнения Хилла-Клоэсси-Уилтшира и Шонера-Хемпеля.
8. Непрерывное управление для поддержания формации. Линейно-квадратичный регулятор.
9. Импульсное управление для поддержания формации. Двухимпульсный маневр.
10. Типы (квази)периодических орбит в окрестности коллинеарных точек либрации.
11. Инвариантные многообразия. Гомоклинические и гетероклинические траектории.
12. Двукратно осредненная задача Хилла. Механизм Лидова-Козаи. Замороженные орбиты.
13. Сопряженные конические сечения. Активные и пассивные гравитационные маневры.
14. Маневры в глубоком космосе. Резонансные траектории. Граф Тиссерана.
15. Низкоэнергетические траектории. Баллистический захват. Межпланетная транспортная сеть.
16. Резонансные сближения и их хаотическая природа. Граф Тиссерана-Пуанкаре.
17. Применение паруса или светоотражающего баллона в задаче увода спутника с орбиты.
18. Межпланетные перелеты с парусом. Некеплеровы орбиты. Миссия «Полярный смотритель».
19. Космические тросовые системы и их применение в задаче увода спутника с орбиты.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Во время проведения дифференцированного зачёта обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Дифференцированный зачёт проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.