



## Программа учебной дисциплины "Небесная механика"

Утверждена Академическим руководителем  
образовательной программы "Физика"  
Протокол № 1 от 20.08.2019 года

Разработчик	Эймонт Н.А., факультет физики ученая степень, фамилия имя отчество, должность
Дата составления программы	20.08.2019
Число кредитов	5 заполняется <u>на факультете</u> по учебному плану
Контактная работа (час.)	48 заполняется <u>на факультете</u> по учебному плану
Самостоятельная работа (час.)	142 заполняется <u>на факультете</u> по учебному плану
Курс, Образовательная программа	1 курс, 1 и 2 модули для какого курса, в каких модулях (семестрах) читается ОП "Физика"
Формат изучения дисциплины	без использования онлайн курса С использованием онлайн курса/ без использования онлайн курса/иное



## 1. Цель, результаты освоения дисциплины, пререквизиты

Задачей курса является формирование базовых представлений в области знаний, относящихся к небесной механике в той ее части, которая включает в себя вопросы проектирования научных космических миссий и обработки получаемой информации в ходе реализации выполняемых на борту космических аппаратов экспериментов. Предполагается, что полученные в ходе изучения включенных в состав курса материалов знания позволят оценивать пределы возможностей реализации миссий в рамках существующих и разрабатываемых технологий, а также формулировать требования к характеристикам и системам космических аппаратов на всех этапах их проектирования и эксплуатации.

## 2. Содержание учебной дисциплины

№ п/п	Название темы	Число часов		
		контактная работа (лекции, семинары, практикумы)	онлайн компонента	самост. работа
1.	<i>Тема 1. Введение</i> В качестве вводной части курса планируется изложение истории небесной механики в общем виде и ее части, относящейся к фазе развития в ее современном виде, когда космические полеты стали повседневной реальностью и, таким образом, небесная механика стала частью физических экспериментов, а космическое пространство – лабораторией для их выполнения. Поэтому содержащаяся в этом разделе информация включает в себя изложение этапов развития ракетной техники и направления индустрии, включающей в себя отрасли, необходимые для разработки и создания космических комплексов, в которые входят не только космические аппараты, но и необходимые для их функционирования наземные комплексы. В этой части курса на примерах реальных событий показывается, как развитие технологий расширяло возможности космических экспериментов и какие перспективы в этом плане ожидаются в обозримом			



	будущем.			
2.	<p><i>Тема 2. Ракетно-космическая техника</i></p> <p>Отдельная часть посвящена описанию ракетно-космической техники. Сюда включены составляющие комплекса, такие как ракеты-носители, стартовые комплексы для них, даются их характеристики и состав ограничений при эксплуатации. Приводятся разъяснения по системам ракет-носителей, в том числе двигательным установкам, системам управления движением, телеметрическим и командным системам, комплексам траекторных измерений, как бортовым, так и наземным. Аналогичный состав сведений приводится для космических аппаратов в зависимости от задач, которые планируется решать с помощью устанавливаемых на них приборов. Рассматривается задача выведения полезной нагрузки на орбиту искусственного спутника Земли и далее. На основании формулы Циолковского излагаются методы оценки выводимого полезного груза в зависимости от конструктивных характеристик ракеты и эффективности ее двигателя, топлива и параметров орбиты. Анализируются различные типы двигателей: химические, электроракетные, газореактивные и с ядерным источником энергии с точки зрения наиболее эффективных областей их применения. Рассматриваются устройства для управления ориентацией космических аппаратов в зависимости от назначения и областей применения.</p>			
3.	<p><i>Тема 3. Задачи околоземных полетов</i></p> <p>Миссии в околоземном пространстве анализируются в плане их оптимального выбора по способам доставки на требуемую орбиту и последующего поддержания полета на этой орбите. В этой связи рассматриваются низкие почти круговые орбиты, в том числе, орбиты для пилотируемых полетов, относящиеся к так называемым почти круговым орбитам. Рассматривается эволюция параметров этих орбит под влиянием отклонения гравитационного поля Земли от</p>			



	<p>центрального, а также в силу воздействия притяжения Солнца, Луны и аэродинамических сил со стороны атмосферы. Специально анализируются случаи движения по солнечно-синхронным орбитам, экваториальным геостационарным и орбитам, используемым для задач навигации (Глонасс и GPS). Излагаются приближенные методы расчетов движения по почти круговым орбитам для случаев проектных оценок, в том числе для определения необходимых затрат топлива для оптимального поддержания орбиты. В рамках решения аналогичной задачи даются подходы к описанию относительного движения группы аппаратов на низких околокруговых орбитах, в том числе для управления сближением и стыковкой аппаратов или проектирования маневров уклонения от их столкновения. В составе описания картины воздействующих на аппарат сил приводятся используемые модели атмосферы Земли с характеристиками их точности и пределов применимости для прогноза движения спутника. Приводятся методы оценки времени существования спутника на орбите вплоть до его входа в ее плотные слои и алгоритмы для расчета необходимых корректирующих маневров с целью удержания аппарата на орбите.</p>			
4.	<p><i>Тема 4. Почти круговые и высокоэллиптические орбиты</i></p> <p>В составе решения задач движения по низким почти круговым околоземным орбитам рассматривается задача предотвращения засорения космического пространства. В этой связи анализируются требуемые международными правилами технологии запуска аппаратов в космическое пространство. Излагаются методы планирования выведения космических аппаратов на орбиту с учетом всего цикла их жизни, т.е. обеспечения их безопасного возвращения на Землю по окончании эксплуатации. Аналогичные подходы описываются для высокоэллиптических орбит спутников</p>			



	<p>Земли с учетом того, что в этих случаях доминирующую роль в эволюции их орбит играют возмущения со стороны гравитационного поля Луны и Солнца. Излагаются методы проектирования высокоэллиптических орбит с заданным временем баллистического существования и эволюции их параметров в приемлемых для экспериментов пределах. В качестве инструмента для проведения необходимого анализа и планирования операций управления приводятся приближенные законы движения аппаратов, позволяющие проводить быстрые оценки пределов допустимых начальных параметров их движения. Кроме того, предлагаются алгоритмы и соответствующие математические программы для аккуратных оценок допустимых значений начальных параметров орбит и последующих операций управления. Для наглядности приводятся данные по такого рода операциям для реализуемых в настоящее время миссий, таких как Радиоастрон и ИНТЕГРАЛ.</p>			
5.	<p><i>Тема 5. Математические модели движения в Солнечной системе</i></p> <p>В качестве универсального инструмента для проведения проектирования и анализа космических миссий предлагается математическая модель движения тел солнечной системы, включая космический аппарат. Тела солнечной системы в этой модели движения описываются моделью, основанной на обработке огромных массивов наблюдательной информации, обработанной с привлечением численного интегрирования дифференциальных уравнений их движения. Для космического аппарата в дифференциальные уравнения включается требуемое приемлемой точностью число гравитирующих тел системы. Для описания этой модели даются объяснения используемых систем координат и отсчета времени. Планируется проведение семинарских занятий с целью освоения указанного инструмента. В качестве</p>			



	<p>удобного учебного примера предлагается задача проектирования траекторий космического аппарата в окрестности коллинеарных солнечно-земных точек либрации L1 и L2. Этот пример выбран в связи приближением даты старта реального проекта Спектр-Рентген-Гамма. Планируется в рамках этого проекта изучить состав требований к траектории космического аппарата и операциям по управлению его орбитальным движением и ориентацией и оптимальные варианты его выведения на орбиту, удовлетворяющую эти требования на интервалах возможных дат старта. Одновременно планируется изучить особенности орбит в окрестности коллинеарных точек либрации.</p>			
6.	<p><i>Тема 6. Алгоритмы и программное обеспечение</i> Алгоритмы и программное обеспечение решения прикладных задач небесной механики. Расчеты орбитального движения опираются на численное интегрирование дифференциальных уравнений движения, соответствующие параграфы излагаются в курсе с учетом особенностей моделей солнечной системы и различных фаз выполнения миссий с учетом требований по требуемой точности расчета параметров траекторий и быстродействия алгоритмов. Рассматриваются типичные случаи вычислений геометрических и кинематических параметров полета, таких как условия видимости аппаратов, относительное положение других небесных объектов, направление и величина скорости в относительном движении, условия по затенению космических аппаратов. Излагаются методы проектирования орбит и маневров для выполнения геометрических и кинематических условий полета. Даются рекомендации по выбору готовых общедоступных алгоритмов, математических программ и баз данных, таких как, например, GMAT и SPICE.</p>			
7.	<p><i>Тема 7. Проектирование миссий по</i></p>			



	<p><i>исследованию планет и их спутников.</i></p> <p>Рассматриваются различные фазы полета при решении задач соответствующих экспериментов, начиная с этапа выведения на перелетную орбиту. При этом используется как идеальный случай перелет по орбите Гомана. Как следующий этап излагается решения задачи Ламберта. Примеры решения этой задачи планируется выполнить в течение семинарских занятий для различных планет Солнечной системы. При этом выбор траекторий предполагается в рамках оптимизации импульсов скорости при старте с Земли и маневре перехода на орбиту спутника планеты. Рассматривается также задача маневров в окрестности планеты назначения, в том числе задача гравитационных маневров, включая многократные, с использованием облетов спутников планеты. Приводятся описания таких многократных маневров, реализованных к настоящему времени и планируемых у Луны и спутников Юпитера и Сатурна, а также у самих планет Солнечной системы, включая Землю. Как пример описывается проект полета аппарата на близкое к Солнцу расстояние, достигаемое на значительном эллиптическом наклонении за счет использования электроракетного двигателя и многократных гравитационных маневров у Венеры. В качестве более сложной задачи излагается проблема возвращения на Землю образцов грунта спутников Марса.</p>			
8.	<p><i>Тема 8. Задачи входа в атмосферу</i></p> <p>Как отдельная задача рассматривается проблема входа космического аппарата в атмосферу планеты с целью достижения ее поверхности или перехода на орбиту спутника планеты за счет аэродинамического торможения атмосферой в случаях прямого захвата, а также для варианта понижения апоцентра орбиты спутника касательными проходами верхних слоев атмосферы.</p>			
9.	<p><i>Тема 9. Комплексные миссии к планетам.</i></p> <p>Как миссия, в которой планируется</p>			



	<p>доставка к планете одним перелетным аппаратом целой группировки, включающей в себя аппараты различного назначения для проведения экспериментов на орбите, в атмосфере и в разных точках поверхности, в настоящее время рассматривается проект «Венера-Д». Небесно-механические задачи этой миссии включаются в состав курса.</p>			
10.	<p><i>Тема 10. Исследования малых тел солнечной системы и управление астероидами</i></p> <p>Исследования малых тел Солнечной системы и астероидно-кометная опасность излагаются с позиции постановки задачи поиска способов предотвращения столкновения с Землей опасных небесных тел. В качестве одного из возможных подходов предлагается метод, включающий в себя посадку на малый астероид космического аппарата. Далее аппарат, используя двигательную установку и гравитационный маневр у Земли, переводит астероид или его часть на орбиту столкновения с опасным астероидом и тем самым предотвращает встречу последнего с Землей. В курсе исследуются возможности реализации такого сценария, а также сценария по доставке фрагмента астероида на орбиту спутника Земли. Описываются также альтернативные сценарии отклонения опасных небесных объектов от траектории столкновения с Землей, включая изменение отражательных характеристик поверхности астероида и применения лазерных установок для испарения его массы и создания таким образом реактивной силы.</p>			
11.	<p><i>Тема 11. Навигация космических аппаратов и определение орбит естественных небесных тел</i></p> <p>Навигация космических аппаратов требует применения специальных систем на Земле и на борту, описание которых входит в состав курса, как и изложение методов обработки выполняемых этими системами траекторных измерений. Рассматривается задача оптимизации</p>			





	<p>планирования этих измерений по достигаемой точности определяемых параметров. Вводится понятие наблюдаемости системы по проводимым измерениям. В проектирование космических миссий входит и определение параметров движения небесных тел, которые являются целью миссий или представляют самостоятельный интерес. В этой связи рассматриваются методы, позволяющие проводить операции по уточнению эфемерид таких тел, а также определять другие их характеристики, как, например, массу и размеры астероидов. Излагаются способы обнаружения и определения орбит экзопланет.</p>			
12.	<p><i>Тема 12. Маневры коррекции параметров движения</i> Маневры коррекции орбитальных параметров движения рассматриваются в плане описания методов оптимизации сценариев их исполнения при учете технических ограничений, накладываемых характеристиками используемых систем управления и двигательных установок. Особое внимание уделяется проблеме постановки задачи коррекции параметров, исходя из требований научных экспериментов. В качестве примера рассматривается задача поддержания движения космического аппарата на орбитах в окрестности коллинеарных точек либрации.</p>			
13.	<p><i>Тема 13. Ориентация и движение около центра масс</i> Определение ориентации и управление движением около центра масс космических аппаратов и анализ возможностей систем ориентации излагаются для различных классов аппаратов. Рассматриваются пассивные, промежуточные и активные системы, включая варианты, не требующие использования ракетных двигателей. Даются описания математических моделей движения около центра масс, применимых для обработки измерений датчиков различных типов с целью</p>			



	определения параметров движения. Рассказывается о построении систем управления с применением в качестве исполнительных элементов маховиков, электромагнитных катушек, гравитационных штанг, создающих моменты, порождаемых градиентом силы тяжести, а также с использованием солнечного паруса с изменяемыми силами светового давления. Планируются семинарские занятия по решению соответствующих задач обработки измерительных данных, в частности, для вариантов построения системы управления ориентацией с помощью стабилизации аппарата вращением.			
--	--	--	--	--

### 3. Оценивание

Оценки по всем формам контроля выставляются по 10-ти балльной шкале.

**Промежуточный контроль** предусматривает выполнение письменных домашних заданий не менее чем по 2 темам (с возможностью выбрать индивидуальные задания дополнительно).

**Завершающий контроль:** устный экзамен в конце 4-го модуля. Экзамен состоит из двух частей – 2 вопроса в билете:

- теоретической, проводится в форме устной беседы по тематике дисциплины (30 мин.);
- письменная задача.

Накопленная оценка включает:

- 1) Оценки за домашние работы -  $O^D$
- 2) Оценка за индивидуальные задания -  $O^I$
- 3) Оценка за активность на семинарах -  $O^C$
- 4) Оценка за экзамен -  $O^Э$

Итоговая оценка рассчитывается по формуле

$$0,5 * (0,4 * O^D + 0,3 * O^I + 0,3 * O^C) + 0,5 O^Э$$

Оценка за экзамен  $O^Э$  выставляется по 10-балльной системе. Студенты, у которых  $0,4 * O^D + 0,3 * O^I + 0,3 * O^C = 10$ , освобождаются от устного экзамена и получают итоговую оценку 10. Студенты с оценкой  $0,4 * O^D + 0,3 * O^I + 0,3 * O^C = 8$  или  $= 9$  могут отвечать только на половину билета (1 вопрос по выбору) на устном экзамене.

Оценки округляются до целых арифметически.

### 4. Примеры оценочных средств

#### Контрольная работа. Примеры задач

- Определить скорость деградации орбиты микроспутника массой 50 кг и поперечным сечением 60 кв.см, запущенного на высоту 500 км.
- Оценить влияние солнечного ветра на изменение траектории аппарата с апогеем 2500 км.



### **Примеры вопросов для оценки качества освоения дисциплины на устном экзамене**

- Задача двух тел. Первые интегралы дифференциальных уравнений движения.
- Формулы для перехода от декартовых координат к элементам орбит.
- Описание эллиптического, параболического и гиперболического движения. Уравнение времени.
- Системы координат и переход между ними.
- Алгоритмы расчета геометрических и кинематических параметров траекторий: углы между различными объектами, продолжительность сохранения этих параметров (видимость, затенение, пределы заданных углов, сочетаний параметров).
- Формулы для почти кругового движения. Оценки времени баллистического существования. Оценки затрат характеристической скорости для поддержания спутников на круговой орбите.
- Сплюснутость Земли и планет и ее влияние на эволюцию элементов орбиты.
- Модели атмосферы и планет.
- Движение в атмосфере при маневрах входа в атмосферу с целью достижения поверхности, перехода на орбиту спутника (захват) и снижения апоцентра орбиты. Коридоры входа. Управление при движении в атмосфере.
- Эволюция эллиптических орбит под влиянием гравитации Солнца и Луны. Выбор начальных параметров орбит с заданным или максимальным временем баллистического существования. Управление эволюцией орбит.
- Проектирование маневров при выведении космического аппарата на геостационарную орбиту ракетодинамическими средствами.
- Выведение на геостационарную орбиту с территории России с использованием облета Луны.
- Проектирование миссий с использованием гравитационных маневров. Пределы возможностей.
- Многократные гравитационные маневры в Солнечной системе. Возможности и ограничения.
- Способы достижения космическим аппаратом орбит с минимальным перигелийным расстоянием и максимальным наклоном к эклиптике за счет использования гравитационных маневров у планет.
- Проектирование миссии к Фобосу (Деймосу) с возвратом грунта. Оптимальный выбор орбит перелета к Марсу и возвращения к Земле, а также промежуточных околомарсианских траекторий. Выбор орбит в окрестности Фобоса, оптимальных для исследования Фобоса.
- Линейные модели орбит в окрестности коллинеарных точек либрации. Оптимальные направления импульсов коррекции в зависимости от задач коррекции. Планирование операций разгрузки маховиков с учетом требований удержания космического аппарата на таких орбитах.
- Алгоритмы управления движением космического аппарата на гало-орбитах (орбитах Лиссажу) с помощью солнечного паруса.
- Алгоритм сохранения заданного относительного положения пары космических аппаратов с помощью солнечного паруса.
- Способы управления астероидами в целях их отклонения от траектории столкновения с Землей.
- Алгоритмы решения задачи Ламберта. Орбиты перелета Гомана.
- Применение методов решения задачи Ламберта в задаче управления малыми астероидами с применением гравитационных маневров для наведения последних на опасные небесные объекты.



- Гравитационные маневры перевода околоземных астероидов на резонансные с орбитой Земли траектории и управление их движением.
- Принципы проектирования ракет-носителей.
- Устройство и характеристики жидкостных ракетных двигателей. Маршевые двигатели и двигатели для задач управления движением космических аппаратов. Электроракетные двигатели.
- Измерительные комплексы для определения параметров траектории космических аппаратов.
- Решение задач обработки траекторных измерений. Оптимизация планирования проведения операций по определению параметров орбиты космических аппаратов.
- Решение задач коррекции движения космических аппаратов.
- Проектирование пассивных систем ориентации космических аппаратов для низких околоземных орбит. Измерительные и исполнительные элементы систем ориентации.
- Математические модели движения аппаратов около центра масс. Модели внешних моментов (аэродинамические, гравитационные, магнитные моменты).

#### Пример домашнего задания

- Оценить энергопотребление комплекса научной аппаратуры на геосинхронной орбите летом.
- Предложить модель космической миссии (состав научных приборов и параметры орбиты) для измерения электромагнитных волн в магнитосфере.

## 5. Ресурсы

### 5.1. Рекомендуемая основная литература

№ п/п	Наименование
1.	<i>П.Е. Эльясберг.</i> Математическое обеспечение космических экспериментов. М., Наука, 19785.

### 5.2. Рекомендуемая дополнительная литература

№ п/п	Наименование

### 5.3. Программное обеспечение

№ п/п	Наименование
1.	

- Гинзбург В.Л. Теоретическая физика и астрофизика (любое издание).



#### **5.4. Профессиональные базы данных, информационные справочные системы, интернет-ресурсы (электронные образовательные ресурсы)**

- Астрофизическая база данных  
<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- Внегалактическая база данных  
<https://ned.ipac.caltech.edu>
- База данных астрофизических обсерваторий, каталоги, математическое обеспечение:  
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/>
- Программное обеспечение для спектрального и временного анализа  
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/>
- Программное обеспечение для работы с файлами в формате FITS:  
<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/fitsio/fitsio.html>

#### **5.5. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Учебные аудитории для учебных занятий по дисциплине обеспечивают использование и демонстрацию тематических иллюстраций, соответствующих программе дисциплины в составе:

- ПЭВМ с доступом в Интернет (операционная система, офисные программы, антивирусные программы);
- мультимедийный проектор с дистанционным управлением.

Учебные аудитории для лабораторных и самостоятельных занятий по дисциплине оснащены ПЭВМ, с программным обеспечением, описанным выше, а также с возможностью подключения к сети Интернет и доступом к электронной информационно-образовательной среде НИУ ВШЭ.

## **6. Особенности организации обучения для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов**

Общая формулировка, не изменять

В случае необходимости, обучающимся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья (по заявлению обучающегося), а для инвалидов также в соответствии с индивидуальной программой реабилитации инвалида, могут предлагаться следующие варианты восприятия учебной информации с учетом их индивидуальных психофизических особенностей, в том числе с применением электронного обучения и дистанционных технологий:

- 6.1. для лиц с нарушениями зрения: в печатной форме увеличенным шрифтом; в форме электронного документа; в форме аудиофайла (перевод учебных материалов в аудиоформат); в печатной форме на языке Брайля; индивидуальные консультации с привлечением тифлосурдопереводчика; индивидуальные задания и консультации.
- 6.2. для лиц с нарушениями слуха: в печатной форме; в форме электронного документа; видеоматериалы с субтитрами; индивидуальные консультации с привлечением сурдопереводчика; индивидуальные задания и консультации.



6.3. для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата: в печатной форме; в форме электронного документа; в форме аудиофайла; индивидуальные задания и консультации.

## **7. Дополнительные сведения**