


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

Кафедра «Динамика и управление полетом летательных аппаратов» (А5)
(наименование)

**УТВЕРЖДАЮ**
Проректор по образовательной
деятельности и цифровизации
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
А.Е. Шашурин
«26» 20 23 г.

ПРОГРАММА
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО НАУЧНОЙ СПЕЦИАЛЬНОСТИ
2.5.16 Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов»
(указывается наименование специальности)

Санкт-Петербург
2023 г.

Цель экзамена – установить глубину профессиональных знаний соискателя ученой степени, уровень подготовленности к самостоятельной научно-исследовательской работе.

Сдача кандидатского экзамена, согласно учебному плану, осуществляется на четвертом году обучения.

Организация и прием кандидатского экзамена

1. Аспирант (соискатель) сдает экзамен в устной или письменной форме.
2. Оценка ответа аспиранта (соискателя) определяется, как среднее арифметическое оценок, полученных за ответы на вопросы каждого из следующих разделов:
 - раздел 1: «Общие положения и принципы динамики полета и управления движением летательных аппаратов»;
 - раздел 2: «Внешние условия полета»;
 - раздел 3: «Силы и моменты, действующие на летательный аппарат (ЛА) в полете»;
 - раздел 4: «Теоретические основы составления математических моделей движения ЛА»;
 - раздел 5: «Исследование математических моделей движения ЛА. Методы решения задач баллистики и динамики полета, в том числе на основе методов оптимального управления в детерминированной и стохастической постановке и теории дифференциальных игр»;
 - раздел 6: «Возмущенное движение ЛА. Статистическая динамика полета и определение характеристик»;
 - раздел 7: «Основы экспериментальной баллистики».

Итоговой оценкой, полученной аспирантом (соискателем) за кандидатский экзамен является оценка, которая определяется, как среднеарифметическое из оценок, полученных за ответы на вопросы каждого из вышеназванных разделов (суммарно за разделы 1 – 7), при условии, что они все положительные.

3. Необходимость пересдачи кандидатского экзамена возникает только в случае смены темы диссертационной работы, приводящей к существенному изменению профиля подготовленной диссертации (изменение первых двух цифр шифра специальности).

Введение

В основу настоящей программы положены следующие фундаментальные дисциплины: теоретическая механика; аэродинамика; баллистика; динамика движения; теория устойчивости; управление в технических системах; теория вероятности и математическая статистика; теория оптимальных систем, системный анализ.

1. Общие положения и принципы динамики полета и управления движением летательных аппаратов

1.1. *Исходные понятия и определения.* Объект исследования и его математическая модель. Состояние баллистического и управляемого ЛА. Параметры управления. Возмущающие воздействия. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. Качество управления и показатели качества.

1.2. *Основные принципы исследования баллистического и управляемого полета.* Принцип обратной связи. Принципы управления начальным, текущим и конечным состоянием. Принцип декомпозиции движений. Принцип независимого (автономного) управления. Принцип сбалансированного движения. Принцип оптимальности.

1.3. *Системы координат и углы, определяющие положение ЛА в пространстве.* Общая характеристика систем координат. Определение взаимной ориентации систем координат. Координатные преобразования.

2. Внешние условия полета

2.1. *Влияние поля тяготения Земли и ее вращения на движение ЛА.* Потенциал силы земного тяготения, форма и размеры Земли. Потенциал силы тяжести. Влияние вращения Земли на полет ракет и снарядов.

2.2. *Земная атмосфера и ее свойства.* Структура атмосферы. Классификация слоев атмосферы. «Стандартные» атмосферы. Упрощенные «законы» изменения параметров атмосферы по высоте.

3. Силы и моменты, действующие на ЛА в полете

3.1. *Аэродинамические силы и моменты.* Вектор аэродинамического сопротивления и обусловленный им момент. Составляющие полной аэродинамической силы и полного аэродинамического момента. Приведение аэродинамических сил и моментов к эталонным (типовым) функциям.

3.2. *Сила тяги, сила тяжести, дополнительные и управляющие силы и моменты.* Реактивная сила. Сила тяги. Эксцентриситет и перекосящий момент силы тяги. Сила тяжести и ее проекции. Дополнительные силы и моменты. Газодинамические и аэродинамические управляющие силы и моменты. Механизм действия их на изменение траекторий движения ЛА.

4. Теоретические основы составления математических моделей движения ЛА

4.1. *Классификация и формы представления математических моделей.* Принципы составления уравнений движения. Летательный аппарат как динамическая система. Возможные виды математических моделей. Уравнение Мещерского. Основные теоремы динамики тел переменной и постоянной масс, принцип затвердевания. Векторные уравнения поступательного движения ЛА как тела переменной массы. Уравнения вращательного движения ЛА. Проекция векторных уравнений на нормаль и касательную к траектории. Балансировочный режим движения. Линеаризация уравнений движения ЛА.

4.2. *Дифференциальные уравнения движения.* Уравнения пространственного движения ЛА на активном участке траектории. Уравнения свободного движения ЛА постоянной массы в плотных слоях атмосферы. Уравнения продольного и бокового движения ЛА в центральном гравитационном поле. Уравнения движения ЛА в плоскопараллельном гравитационном поле. Уравнения наведения. Уравнения движения ЛА при перегрузках.

4.3. *Уравнения, описывающие свободное движение центра масс ЛА без учета сопротивления внешней среды.* Уравнения относительного движения космических аппаратов. Уравнения движения спускаемых аппаратов в атмосферах планет с недостаточно изученными свойствами.

5. Исследование математических моделей движения ЛА. Методы решения задач баллистики и динамики полета

5.1. *Устойчивость движения ЛА.* Общие понятия об устойчивости движения. Первый метод Ляпунова. Устойчивость по первому приближению. Второй метод Ляпунова. Техническая устойчивость. Статическая и динамическая устойчивость при продольном и боковом движении. Устойчивость движения быстровращающихся ЛА.

5.2. *Численное интегрирование уравнений движения ЛА.* Методы численного интегрирования и их применение при решении задач динамики полета. Точность расчетов и выбор шага интегрирования. Программное обеспечение численных расчетов.

5.3. *Приближенные аналитические, графоаналитические и табличные методы решения.* Параболическая теория. Эллиптическая теория. Применение метода аналитических функций для описания силы сопротивления внешней среды. Метод псевдоскорости. Основные и вспомогательные функции. Подобие траекторий и табличные методы решения.

5.4. *Оптимизационные задачи баллистики.* Двухточечные краевые задачи. Постановка задачи определения многоточечной кривой в краевых задачах управляемого полета. Обратные задачи баллистики.

Экстремальные задачи программирования опорного движения. Постановка и классификация задач вариационного исчисления и оптимального управления. Оптимальное программирование опорного движения на основе методов классического вариационного исчисления. Определение оптимального управления движением ЛА на основе принципа максимума и метода динамического программирования. Оптимальное управление в стохастической постановке. Методы адаптивного управления. Применение методов теории дифференциальных игр для управления движением ЛА.

5.5. *Исследование углового движения.* Стабилизация углового движения. Методы стабилизации. Достаточные условия устойчивости углового движения ЛА различного назначения. Влияние структуры действующих сил на устойчивость углового движения быстровращающихся оперенных ЛА. Движение относительно центра масс оперенных вращающихся и невращающихся ЛА. Резонанс вращающихся оперенных ЛА. Устойчивость резонансных режимов вращения. Движение ЛА при входе в атмосферу. Качественный анализ углового движения ЛА при входе и движении в атмосфере.

5.6. *Методы наведения ЛА на подвижные цели.* Кинематический анализ свойств траекторий наведения. Методы самонаведения: метод погони, наведение с упреждением, параллельное сближение, пропорциональное наведение, метод прямого наведения. Методы теленаведения: угловой метод наведения, наведение по методу совмещения. Промах ЛА при наведении на подвижную цель.

5.7. *Инерциальная навигация и наведение баллистических ракет (БР) и головных частей (ГЧ).* Методы решения уравнений навигации в платформенных и бесплатформенных инерциальных навигационных системах (ИНС). Общая характеристика методов наведения БР и ГЧ. Математическое содержание задач наведения.

Методы определения программ управления в функциональном методе наведения. Управление отделением ГЧ в функциональном методе наведения. Наведение по методу текущей требуемой скорости. Наведение по методу конечной требуемой скорости. Наведение по методу требуемых ускорений.

5.8. *Орбитальное движение и баллистико-навигационное обеспечение полета космических аппаратов (КА).* Расчет параметров невозмущенного орбитального движения. Определение орбиты по заданным условиям движения. Определение орбиты по данным внешнетраекторных измерений. Прогнозирование движения КА. Корректирующие маневры. Маневры сближения и встреча КА на орбите. Навигационное обеспечение и автономная навигация при выполнении межорбитальных маневров. Межпланетные перелеты. Баллистическое проектирование орбитальных структур спутниковых систем. Методические особенности решения баллистико-навигационных задач при оперативном управлении полетом КА.

6. Возмущенное движение ЛА.

Статистическая динамика полета и определение характеристик

6.1. *Теория дифференциальной коррекции («теория поправок») и расчет возмущенных траекторий.* Общая характеристика возмущений и возмущенного движения. Методы определения баллистических производных. Методы определения полных (изофункциональных) отклонений параметров движения.

6.2. *Учет влияния параметров атмосферы на движение ЛА.* Способы учета влияния отклонений метеофакторов на движение ЛА. Баллистический средний ветер и баллистическое отклонение температуры. Метеорологическая подготовка пуска ЛА.

6.3. *Орбитальное возмущенное движение.* Задача n -тел и методы ее решения. Ограниченная задача трех тел. Гравитационные сферы. Метод оскулирующих элементов. Возмущения, вызываемые нецентральнойностью поля тяготения Земли, сопротивлением атмосферы, давлением солнечного света. Влияние начальных возмущений на движение искусственного спутника Земли по круговой орбите. Время существования КА на орбите.

6.4. *Методы статистической динамики полета, рассеивание ЛА.* Методы априорного статистического анализа движения ЛА. Определение характеристик рассеивания методами статистических испытаний. Определение характеристик рассеивания по результатам опытных стрельб. Статистическая динамика корректируемых ЛА, суббоеприпасов, боевых и поражающих элементов сложной формы. Обработка данных пристрелки и боевых стрельб.

7. Основы экспериментальной баллистики

7.1. *Методы и основные задачи экспериментальной баллистики.* Общая характеристика стрельб на баллистических трассах. Определение скорости движения снаряда (либо модели) стрельбой на баллистической трассе. Определение коэффициента лобового сопротивления, аэродинамических коэффициентов нормальной силы и опрокидывающего момента.

7.2. *Полигонные стрельбы и летные испытания.* Определение параметров движения снаряда по данным полигонных испытаний. Стрельбы на дальность и кучность. Определение деривации. Сострел дальностей и начальных скоростей при изменении конструктивных элементов боеприпаса. Планирование летного баллистического эксперимента. Методы обработки результатов измерений. Идентификация параметров ЛА по данным полигонных стрельб и летных испытаний.

Рекомендованная литература

Основная литература

1. Дмитриевский А.А., Лысенко Л.Н. Внешняя баллистика: Учебник для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005.
2. Лысенко Л.Н. Наведение и навигация баллистических ракет. М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
3. Шалыгин А.С., Лысенко Л.Н., Толпегин О.А. Методы моделирования ситуационного управления движением беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 2012.
4. Толпегин О.А. Дифференциально-игровые методы управления беспилотными летательными аппаратами. СПб.: Изд-во БГТУ, 2009.
5. Толпегин О.А. Области достижимости летательных аппаратов. СПб.: Изд-во БГТУ, 2013.
6. Кашин В.М., Лифиц А.Л. Методологические основы проектирования переносных зенитных ракетных комплексов. М.: Наука, 2013.
7. Соловей Э.Я., Храпов А.В. Динамика систем наведения управляемых авиабомб. М.: Машиностроение, 2006.
8. Панов В.В., Горчица Г.И., Балько Ю.П. и др. Формирование рационального облика перспективных авиационных ракетных систем и комплексов. М.: Машиностроение, 2010.
9. Биард, Рэндал У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. пер. с англ. Р. У. Биард, Т. У. МакЛэйн. - М. : Техносфера, 2018.
10. Емельянов В.Ю., Захаров А.Ю., Мишина О.А. Теория управления : тексты лекций [для вузов]. - СПб.: БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2019.
11. Подоплёкин Ю.Ф., Соловьёва В.В., Толмачёв С.Г., Шаров С.Н. Интеллектуальные информационные управляющие системы со сложными локационными сигналами для беспилотных летательных аппаратов. СПб.: БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2020.
12. Лысенко, Лев Николаевич и др. Внешняя баллистика : учебное пособие для вузов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018.
13. Романов А.В., Тестоедов Н.А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов : учебник [для вузов] / ред. В. Д. Атамасов ; Конструктор. бюро "Арсенал" им. М. В. Фрунзе, Информ. спутник. системы им. акад. М. Ф. Решетнёва. - СПб. : Профессионал, 2015.
14. Лентовский В.В. [и др.] Системы ориентации и наведения беспилотных летательных аппаратов: учебное пособие [для вузов]. СПб.: БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2019.
15. Шаров С.Н. и др. Синтез и обработка сложных локационных сигналов информационных каналов систем управления : учебное пособие [для вузов]. СПб.: БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2019.
16. Шаров С.Н. Информационные каналы систем управления: учебное пособие [для вузов]; Концерн "Гранит-Электрон", БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, Рос. акад. ракет. и арт. наук. - АВТ. РЕД. - СПб.: 2018.

Дополнительная литература

1. Иванов Н.М., Лысенко Л.Н. Баллистика и навигация космических аппаратов: Учебник для вузов. М.: Дрофа, 2004.
2. Разоренов Г.Н., Бахрамов Э.А., Титов Ю.Ф. Системы управления летательными

- аппаратами. Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2003.
3. Скребушевский Б.С. Управление полетом беспилотных космических аппаратов. М.: Из-во «ВЛАДМО», 2003.
 4. Аппазов Р.Ф., Лавров С.С., Мишин В.П. Баллистика управляемых ракет дальнего действия. М.: Наука, 1966.
 5. Баллистика и навигация ракет: Учебник для вузов / А.А. Дмитриевский, Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко и др. М.: Машиностроение, 1985.
 6. Расчет и анализ движения летательных аппаратов / С.А. Горбатенко и др. М.: Машиностроение, 1971.
 7. Иванов Н.М., Мартынов А.И. Движение космических летательных аппаратов в атмосферах планет. М.: Наука, 1985.
 8. Ишлинский А.Ю. Инерциальное управление баллистических ракет. М.: Наука, 1968.
 9. Кузмак Г.Е. Динамика неуправляемого движения летательных аппаратов при входе в атмосферу. М.: Наука, 1970.
 10. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1973.
 11. Лебедев А.А., Герасюта Н.Ф. Баллистика ракет. М.: Машиностроение, 1970.
 12. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. М.: Машиностроение, 1969.
 13. Погорелов Д.А. Теория кеплеровых движений летательных аппаратов. М.: Физматгиз, 1961.
 14. Постников А.Г., Чуйко В.С. Высшая баллистика неуправляемых ракет и снарядов. М.: Машиностроение, 1985.
 15. Святодух В.К. Динамика пространственного движения управляемых ракет. М.: Машиностроение, 1969.
 16. Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика летательных аппаратов. М.: Наука, 1982.
 17. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов: Учеб. пособие для вузов / А.А. Лебедев, В.Т. Бобронников, М.Н. Красильщиков, В.В. Малышев. М.: Машиностроение, 1985.
 18. Ярошевский В.А. Динамика неуправляемого тела в атмосфере. М.: Машиностроение, 1978.
 19. Брандин В.Н., Разоренов Г.Н. Определение траекторий космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1978.
 20. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Нариманова Г.С., Тихонравова М.К.. М.: Машиностроение, 1972.
 21. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф., Сихарулидзе Ю.Г. Алгоритмы управления космическим аппаратом при входе в атмосферу. М.: Наука, 1975.
 22. Шкадов Л.М., Буханова Р.С., Илларионов В.Ф. Механика оптимального пространственного движения летательных аппаратов в атмосфере. М.: Машиностроение, 1972.
 23. Эльясберг П.Е. Введение в теорию полета искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1975.
 24. Теоретические основы управления полетом баллистических ракет и головных частей. Ч. 1. Учебник для слушателей военных академий / Под ред. Г.Н.Разоренова М.: ВА РВСН, 2001.
 25. Можаяев Г.В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем. М.: Машиностроение, 1989.
 26. Аппазов Р.Ф., Сыгин О.Г. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. М.: Наука, 1987.
 27. Охоцимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г. Основы механики космического полета. М.: Наука, 1990.
 28. Скребушевский Б.С. Формирование орбит КА. М.: Машиностроение, 1990.
 29. Алексеева К.С. [и др.] Исследование динамики инерциальных навигационных систем

- управления беспилотных летательных аппаратов : практикум [для вузов] - СПб. : Изд-во БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова, 2023.
30. Бородавкин В. А., Зыков С.А., Петрова И.Л. Исследование ракетных систем на компьютерных моделях.: учебное пособие [для вузов], БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. :2022.
 31. Петрова И.Л., Алексеева К.С., Емельянов В.Ю., Баранов Н.Е. Исследование динамики систем стабилизации беспилотных летательных аппаратов. Учебное пособие [для вузов], ред. Толпегина О.А.; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. : 2020.
 32. Лемешонок Т.Ю., Сизова А.А. Траекторные задачи в динамике движения летательных аппаратов. Практикум [для вузов] БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова. - СПб. : 2021.
 33. Лемешонок Т.Ю., Сизова А.А., Баранов Н.Е., Санников В.А. Математические модели динамики движения летательных аппаратов. Учебное пособие [для вузов] /; БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова. - СПб. : 2020.
 34. Толпегин О.А. Методы адаптивного управления летательными аппаратами. Тексты лекций. [учебное пособие для вузов] БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. : 2014.
 35. Толпегин О.А. Экспериментальная баллистика Тексты лекций [для вузов] БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. : 2015.
 36. Толпегин О.А., Кашин В.М., Новиков В.Г. Математические модели систем наведения ракет: учебное пособие [для вузов] БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д. Ф. Устинова. - СПб. : 2016.
 37. Толпегин О.А. Методы управления движением беспилотных летательных аппаратов на основе теории дифференциальных игр. - СПб. : Наука, 2021.
 38. Шалыгин А.С., Санников В.А. Устойчивость динамических систем автоматического управления. Учебное пособие [для вузов] БГТУ "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова. - СПб.: 2015.