

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

УТВЕРЖДЕНО

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

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Флаттер летательных аппаратов
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Беспилотные авиационные системы Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра прочности летательных аппаратов
курс:	4
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 0 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: С.Э. Парышев, канд. техн. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры прочности летательных аппаратов 22.03.2024

Аннотация

Дисциплина «Флаттер летательных аппаратов» включает в себя изучение основ явления флаттера, критических скоростей самолета и предотвращения разрушения ЛА.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- знакомство студентов с основами аэроупругости летательных аппаратов, включая расчетные и экспериментальные методы обеспечения безопасности от флаттера, реверса, дивергенции, а также введение в аэросервоупругость.

Задачи дисциплины

- формирование у студентов базовых знаний в области обеспечения безопасности проектируемых летательных аппаратов от явлений аэроупругости. Содержание курса охватывает широкий круг научно-методических вопросов, возникающих при расчетно-теоретических и экспериментальных работах, проводимых как на динамически подобных моделях, так и на натурных конструкциях дозвуковых и сверхзвуковых аппаратов. Обеспечение безопасности летательных аппаратов от опасных явлений аэроупругости на всех стадиях разработки и сертификации является важной и сложной задачей. Цикл работ включает в себя анализ статистики и теоретические расчеты на ранних стадиях проектирования, создание динамически подобных моделей на стадии рабочего проектирования, испытания моделей и их агрегатов в аэродинамических трубах, частотные испытания модели и натуре для верификации расчетных схем, коррекцию математических моделей, исполнительные расчеты и летные испытания натурной конструкции. Все эти работы проводятся для получения доказательных материалов, обосновывающих безопасность, и для последующей сертификации конструкции перед серийным производством.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.5 Владеет навыками безопасной работы с современными научными приборами и другим экспериментальным оборудованием
	ПК-1.6 Знает основные правила поведения и работы в современной научной лаборатории
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента

	ПК-1.8 Владеет навыками работы с современными языками программирования и программными пакетами для научных расчетов
	ПК-1.9 Знает перечень ведущих периодических научных изданий и способен выделять актуальные научные публикации в профессиональной области
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
	ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области
	ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов
	ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- использование методов проектирования элементов летательных аппаратов;
- обучающиеся должны уметь использовать методы проектирования элементов ЛА в соответствии с требованиями их (ЛА) в процессе проектирования и эксплуатации.

уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными.

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	Понятие о явлении флаттера. Критическая скорость. Опасность флаттера для самолета.		1		1
2	Упрощенная аэродинамическая теория для крыла, колеблющегося в потоке воздуха. Гипотеза стационарности.		1		1
3	Модельная задача о флаттере крыла с двумя степенями свободы. Абсолютно жесткое крыло, подвешенное на пружинах.		1		1
4	Нестационарная аэродинамическая теория для профиля. Число Струхаля. Функции Теодорсена, Кюсснера, Вагнера.		1		1
5	Схематизация крыла консольной балкой с прямолинейной осью жесткости. Задание форм колебаний крыла при расчете на флаттер.		2		1
6	Расчет критической скорости и частоты флаттера самолета с легким прямым крылом. Корректировка расчетного и экспериментального значения величины.		2		1
7	Расчет собственных колебаний целого самолета как системы балок по "свободной схеме". Использование условий ортогональности собственных функций.		2		1
8	Влияние сжимаемости воздуха на флаттер крыла. Опыты в скоростных аэродинамических трубах.		2		1
9	Современные численные методы расчета аэродинамических воздействий на колеблющееся крыло в дозвуковом потоке.		2		1
10	Расчет нестационарных аэродинамических воздействий в сверхзвуковом потоке панельным методом.		2		1
11	Обзор основных явлений аэроупругости в трансзвуковом диапазоне скоростей. Расчетные методы исследования аэродинамических воздействий.		2		1
12	Схематизация крыла малого удлинения.		2		1
13	Применение метода конечных элементов (МКЭ) для анализа флаттера. Схема расчетов.		2		1

14	Влияние на критическую скорость флаттера основных конструктивных параметров: распределения жесткостей, расположения и величины сосредоточенных грузов, двигателей, подвесных баков и т.п.		2		1
15	Безрулевой флаттер хвостового оперения. Флаттер стабилизатора. Флаттер киля.		2		
16	Элеронные и рулевые формы флаттера. Весовая балансировка элеронов и рулей. Расчет весовой балансировки.		2		1
17	Автоколебания упругого самолета с системой автоматического управления. Способы устранения автоколебаний.		2		
Итого часов			30		15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

Семестр: 8 (Весенний)

1. Понятие о явлении флаттера. Критическая скорость. Опасность флаттера для самолета.

Понятие о явлении флаттера. Критическая скорость. Опасность флаттера для самолета. Различные виды флаттера. Описание некоторых случаев катастроф и аварий самолетов от флаттера. Статистика аварий. Нормы прочности. Роль отечественных ученых в исследованиях флаттера и в разработке способов борьбы с ним.

2. Упрощенная аэродинамическая теория для крыла, колеблющегося в потоке воздуха. Гипотеза стационарности.

Упрощенная аэродинамическая теория для крыла, колеблющегося в потоке воздуха. Гипотеза стационарности. Вычисление аэродинамических сил и моментов для тонкого крыла бесконечного размаха. Простейший учет конечности размаха.

3. Модельная задача о флаттере крыла с двумя степенями свободы. Абсолютно жесткое крыло, подвешенное на пружинах.

Модельная задача о флаттере крыла с двумя степенями свободы. Абсолютно жесткое крыло, подвешенное на пружинах. Уравнения движения. Характеристическое уравнение. Критерий устойчивости Рауса. Флаттер и дивергенция. Влияние некоторых параметров на критическую скорость и частоту флаттера.

4. Нестационарная аэродинамическая теория для профиля. Число Струхала. Функции Теодорсена, Кюсснера, Вагнера.

Нестационарная аэродинамическая теория для профиля. Число Струхала. Функции Теодорсена, Кюсснера, Вагнера. Определение границы устойчивости в нестационарном случае. О возможности автоколебаний с одной степенью свободы.

5. Схематизация крыла консольной балкой с прямолинейной осью жесткости. Задание форм колебаний крыла при расчете на флаттер.

Схематизация крыла консольной балкой с прямолинейной осью жесткости. Задание форм колебаний крыла при расчете на флаттер. Метод последовательных приближений для расчета изгибных и крутильных форм собственных колебаний консольного крыла. Совместные колебания изгиба и кручения.

6. Расчет критической скорости и частоты флаттера самолета с легким прямым крылом. Корректировка расчетного и экспериментального значения величины.

Расчет критической скорости и частоты флаттера самолета с легким прямым крылом. Корректировка расчетного и экспериментального значения величины критической скорости по результатам частотных испытаний. Использование экспериментальных аэродинамических коэффициентов.

7. Расчет собственных колебаний целого самолета как системы балок по "свободной схеме". Использование условий ортогональности собственных функций.

Расчет собственных колебаний целого самолета как системы балок по "свободной схеме". Использование условий ортогональности собственных функций. Построение метода последовательных приближений для расчета собственных колебаний самолета. Случай плохой сходимости. Спектр симметричных и антисимметричных колебаний. Применение ЭЦВМ.

8. Влияние сжимаемости воздуха на флаттер крыла. Опыты в скоростных аэродинамических трубах.

Влияние сжимаемости воздуха на флаттер крыла. Опыты в скоростных аэродинамических трубах. Упрощенный учет влияния сжимаемости воздуха на величину критической скорости. Флаттер на дозвуковой и сверхзвуковой скорости. Флаттер самолета с легким стреловидным крылом. "Эффект скольжения". Сравнение теоретических и экспериментальных результатов.

9. Современные численные методы расчета аэродинамических воздействий на колеблющееся крыло в дозвуковом потоке.

Современные численные методы расчета аэродинамических воздействий на колеблющееся крыло в дозвуковом потоке. Метод диполей. Метод вихревой решетки. Сведение задачи к матричному виду. Матрица влияния.

10. Расчет нестационарных аэродинамических воздействий в сверхзвуковом потоке панельным методом.

Расчет нестационарных аэродинамических воздействий в сверхзвуковом потоке панельным методом. Интегральное уравнение. Зоны влияния. Расчетная схема. Условия сходимости интегралов. Решение в матричном виде.

11. Обзор основных явлений аэроупругости в трансзвуковом диапазоне скоростей. Расчетные методы исследования аэродинамических воздействий.

Обзор основных явлений аэроупругости в трансзвуковом диапазоне скоростей. Расчетные методы исследования аэродинамических воздействий. Уравнения Эйлера. Интегрирование уравнений Эйлера. Схема Годунова. Пределы применимости метода. Влияние вязкости газа. Уравнения Навье-Стокса.

12. Схематизация крыла малого удлинения.

Схематизация крыла малого удлинения. Метод полиномов. Основные элементы расчетной схемы (панели, балки, пластины, сосредоточенные массы, пружины). Схематизация органов управления. Комбинированная схема летательного аппарата. Уравнения флаттера в общем случае.

13. Применение метода конечных элементов (МКЭ) для анализа флаттера. Схема расчетов.

Применение метода конечных элементов (МКЭ) для анализа флаттера. Схема расчетов. Частоты и формы собственных колебаний. Выбор обобщенных координат, понижение размерности задачи. Современные программы на основе МКЭ.

14. Влияние на критическую скорость флаттера основных конструктивных параметров: распределения жесткостей, расположения и величины сосредоточенных грузов, двигателей, подвесных баков и т.п.

Влияние на критическую скорость флаттера основных конструктивных параметров: распределения жесткостей, расположения и величины сосредоточенных грузов, двигателей, подвесных баков и т.п. Многообразие возможных форм флаттера. Средства повышения критической скорости флаттера. Оценка с точки зрения безопасности от флаттера различных компоновок самолета.

15. Безрулевой флаттер хвостового оперения. Флаттер стабилизатора. Флаттер киля.

Безрулевой флаттер хвостового оперения. Флаттер стабилизатора. Флаттер киля. Флаттер стреловидного оперения с высоко расположенным стабилизатором. Флаттер двукильевого хвостового оперения. Флаттер управляемого стабилизатора.

16. Элеронные и рулевые формы флаттера. Весовая балансировка элеронов и рулей. Расчет весовой балансировки.

Элеронные и рулевые формы флаттера. Весовая балансировка элеронов и рулей. Расчет весовой балансировки. Влияние аэродинамической компенсации. Флаттер сервокомпенсатора и триммера. Крутильно-элеронный флаттер. Упрощенные критерии для простейших летательных аппаратов.

17. Автоколебания упругого самолета с системой автоматического управления. Способы устранения автоколебаний.

Автоколебания упругого самолета с системой автоматического управления. Способы устранения автоколебаний. Применение систем автоматического управления для увеличения демпфирования, снижения нагрузок, подавления флаттера. Особенности цифровых систем управления.

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

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Аэроупругость [Текст], Aeroelasticity/Р. Л. Бисплингхофф, Х. Эшли, Р. Л. Халфмэн, -М., Изд-во иностр. лит., 1958
2. Крыло в нестационарном потоке газа [Текст]/С. М. Белоцерковский, Б. К. Скрипач, В. Г. Табачников, под ред. С. М. Белоцерковского, -М., Наука, 1971
3. Экспериментальный анализ переходных процессов в линейных электрических цепях [Текст]/И. И. Теумин, -М., Советское радио, 1956

Дополнительная литература

1. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости [Текст]/В. В. Болотин, -М., Физматгиз, 1961
2. Введение в теорию устойчивости движения [Текст] / Д. Р. Меркин - М.Наука,1971

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

Не используются

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

стандартные Microsoft Windows и Microsoft Office, Adobe Acrobat, проигрыватель видеофайлов.

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

Студент, изучающий дисциплину "Флаттер летательных аппаратов", 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 учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к дифференцированному зачету.

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:	Беспилотные авиационные системы Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра прочности летательных аппаратов
курс:	<u>4</u>
квалификация:	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: С.Э. Парышев, канд. техн. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
	ПК-1.2 Имеет глубокое знание и понимание базовых математических дисциплин
	ПК-1.3 Владеет культурой постановки научной задачи и моделирования естественнонаучных объектов и систем
	ПК-1.4 Умеет строить математические модели для описания и исследования процессов и явлений в соответствующих научных областях
	ПК-1.5 Владеет навыками безопасной работы с современными научными приборами и другим экспериментальным оборудованием
	ПК-1.6 Знает основные правила поведения и работы в современной научной лаборатории
	ПК-1.7 Способен оценивать требуемые ресурсы (материальные и временные) для планирования и проведения научного эксперимента
	ПК-1.8 Владеет навыками работы с современными языками программирования и программными пакетами для научных расчетов
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-1.9 Знает перечень ведущих периодических научных изданий и способен выделять актуальные научные публикации в профессиональной области
	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
	ПК-2.2 Умеет находить ключевые параметры, определяющие изучаемое явление, и производить численные оценки по порядку величины
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-2.3 Способен представлять научные утверждения, их обоснования и доказательства, научные проблемы и их решения ясно и точно в терминах, понятных для профессиональной аудитории, в письменной и устной форме
	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов
	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов

ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов

ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Флаттер летательных аппаратов» обучающийся должен:

знать:

- использование методов проектирования элементов летательных аппаратов;
- обучающиеся должны уметь использовать методы проектирования элементов ЛА в соответствии с требованиями их (ЛА) в процессе проектирования и эксплуатации.

уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач и технологических задач;
- делать правильные выводы из сопоставления результатов теории и эксперимента;
- производить численные оценки по порядку величины;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов опыта и сопоставления с теоретическими данными.

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

1. Расчет нестационарных аэродинамических воздействий в сверхзвуковом потоке панельным методом.
2. Интегральное уравнение. Зоны влияния. Расчетная схема.
3. Условия сходимости интегралов. Решение в матричном виде.
4. Обзор основных явлений аэроупругости в трансзвуковом диапазоне скоростей.
5. Расчетные методы исследования аэродинамических воздействий. Уравнения Эйлера.
6. Интегрирование уравнений Эйлера. Схема Годунова.
7. Пределы применимости метода. Влияние вязкости газа. Уравнения Навье-Стокса.
8. Схематизация крыла малого удлинения. Метод полиномов.
9. Основные элементы расчетной схемы (панели, балки, пластины, сосредоточенные массы, пружины).
10. Схематизация органов управления. Комбинированная схема летательного аппарата. Уравнения флаттера в общем случае.
11. Применение метода конечных элементов (МКЭ) для анализа флаттера. Схема расчетов.
12. Частоты и формы собственных колебаний. Выбор обобщенных координат, понижение размерности задачи.
13. Современные программы на основе МКЭ.
14. Сертификация самолетов по условиям безопасности от флаттера. Применяемые нормы.
15. Коэффициенты запасов и их содержание. Типовая последовательность работ для обеспечения безопасности от флаттера проектируемых самолетов.
16. Летные испытания самолета на флаттер. Колебания крыла при скоростях полета ниже критической скорости флаттера.
17. Зависимость декремента колебаний от скорости полета. "Злой" и "добрый" флаттер. Определение критической скорости по методу Шлиппе, Циммермана.
18. Другие экстраполяционные методы. Измерительная аппаратура и средства возбуждения в полете. Анализ результатов летных испытаний на флаттер.

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

1. Понятие о явлении флаттера. Критическая скорость. Опасность флаттера для самолета. Различные виды флаттера. Описание некоторых случаев катастроф и аварий самолетов от флаттера. Статистика аварий. Нормы прочности. Роль отечественных ученых в исследованиях флаттера и в разработке способов борьбы с ним.
2. Упрощенная аэродинамическая теория для крыла, колеблющегося в потоке воздуха. Гипотеза стационарности. Вычисление аэродинамических сил и моментов для тонкого крыла бесконечного размаха. Простейший учет конечности размаха.
3. Модельная задача о флаттере крыла с двумя степенями свободы. Абсолютно жесткое крыло, подвешенное на пружинах. Уравнения движения. Характеристическое уравнение. Критерий устойчивости Рауса. Флаттер и дивергенция. Влияние некоторых параметров на критическую скорость и частоту флаттера.
4. Нестационарная аэродинамическая теория для профиля. Число Струхала. Функции Теодорсена, Кюсснера, Вагнера. Определение границы устойчивости в нестационарном случае. О возможности автоколебаний с одной степенью свободы.
5. Схематизация крыла консольной балкой с прямолинейной осью жесткости. Задание форм колебаний крыла при расчете на флаттер. Метод последовательных приближений для расчета изгибных и крутильных форм собственных колебаний консольного крыла. Совместные колебания изгиба и кручения.
6. Расчет критической скорости и частоты флаттера самолета с легким прямым крылом. Корректировка расчетного и экспериментального значения величины критической скорости по результатам частотных испытаний. Использование экспериментальных аэродинамических коэффициентов.
7. Расчет собственных колебаний целого самолета как системы балок по "свободной схеме". Использование условий ортогональности собственных функций. Построение метода последовательных приближений для расчета собственных колебаний самолета. Случай плохой сходимости. Спектр симметричных и антисимметричных колебаний. Применение ЭЦВМ.
8. Влияние сжимаемости воздуха на флаттер крыла. Опыты в скоростных аэродинамических трубах. Упрощенный учет влияния сжимаемости воздуха на величину критической скорости. Флаттер на дозвуковой и сверхзвуковой скорости. Флаттер самолета с легким стреловидным крылом. "Эффект скольжения". Сравнение теоретических и экспериментальных результатов.
9. Современные численные методы расчета аэродинамических воздействий на колеблющееся крыло в дозвуковом потоке. Метод диполей. Метод вихревой решетки. Сведение задачи к матричному виду. Матрица влияния.
10. Расчет нестационарных аэродинамических воздействий в сверхзвуковом потоке панельным методом. Интегральное уравнение. Зоны влияния. Расчетная схема. Условия сходимости интегралов. Решение в матричном виде.
11. Обзор основных явлений аэроупругости в трансзвуковом диапазоне скоростей. Расчетные методы исследования аэродинамических воздействий. Уравнения Эйлера. Интегрирование уравнений Эйлера. Схема Годунова. Пределы применимости метода. Влияние вязкости газа. Уравнения Навье-Стокса.
12. Схематизация крыла малого удлинения. Метод полиномов. Основные элементы расчетной схемы (панели, балки, пластины, сосредоточенные массы, пружины). Схематизация органов управления. Комбинированная схема летательного аппарата. Уравнения флаттера в общем случае.
13. Применение метода конечных элементов (МКЭ) для анализа флаттера. Схема расчетов. Частоты и формы собственных колебаний. Выбор обобщенных координат, понижение размерности задачи. Современные программы на основе МКЭ.
14. Сертификация самолетов по условиям безопасности от флаттера. Применяемые нормы. Коэффициенты запасов и их содержание. Типовая последовательность работ для обеспечения безопасности от флаттера проектируемых самолетов.
15. Летные испытания самолета на флаттер. Колебания крыла при скоростях полета ниже критической скорости флаттера. Зависимость декремента колебаний от скорости полета. "Злой" и "добрый" флаттер. Определение критической скорости по методу Шлиппе, Циммермана. Другие экстраполяционные методы. Измерительная аппаратура и средства возбуждения в полете. Анализ результатов летных испытаний на флаттер.

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 зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой.

Дифференцированный зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.