

**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:	Прикладная теория упругости
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Авиационные технологии
	Физтех-школа авиационных и цифровых технологий
	кафедра прочности летательных аппаратов
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Зачет

2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Г.Н. Замула, д-р техн. наук, профессор, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры прочности летательных аппаратов 04.06.2020

Аннотация

Программа "Прикладная теория упругости" направлена на изучение прикладных методов и моделей теории упругости применительно к характерным для авиастроения тонкостенным каркасированным конструкциям из металлических и композиционных материалов. В курсе изучаются как континуальные (описываемые дифференциальными уравнениями), так и дискретные (сводящиеся к большим системам алгебраических уравнений) модели, а также современные схемы и примеры их решения. Отдельное внимание уделено теории пластин и оболочек, устойчивости, критериям и нелинейным задачам статической прочности, методу конечных элементов, термонапряженным конструкциям.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

изучение прикладных методов и моделей теории упругости применительно к характерным для авиастроения тонкостенным каркасированным конструкциям из металлических и композиционных материалов. В курсе изучаются как континуальные (описываемые дифференциальными уравнениями), так и дискретные (сводящиеся к большим системам алгебраических уравнений) модели, а также современные схемы и примеры их решения. Отдельное внимание уделено теории пластин и оболочек, устойчивости, критериям и нелинейным задачам статической прочности, методу конечных элементов, термонапряженным конструкциям.

Задачи дисциплины

- получение студентами теоретических знаний и практических навыков по их применению при исследованиях напряженно-деформированного состояния и устойчивости авиаконструкций;
- обучение умению правильно моделировать и решать конкретные проблемы, возникающие при проектировании ЛА;
- подготовка к разработкам и использованию современного программного обеспечения по прочности для ЭВМ;
- расширение и интегрирование полученных в области прикладной теории упругости знаний в общую систему профессиональных знаний студентов по прочности ЛА.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- континуальные и дискретные модели и методы прикладной теории упругости, в т. ч. для композитных и «горячих» конструкций.

уметь:

- использовать полученные знания при решении практических и новых задач, дальнейших исследованиях по развитию науки о прочности ЛА;
- правильно оценивать полученные результаты работ, предлагать инновационные и оптимальные решения.

владеть:

- навыками и методами решения задач ПТУ;
- навыками построения новых моделей и расчетных схем для конкретных авиаконструкций;
- опытом работы с новой информацией и литературой по дисциплине, в т. ч. на английском языке.

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	Предмет курса. Основные разделы. Его роль и связи с другими курсами.	2			
2	Основные понятия. Континуальные и дискретные модели прикладной теории упругости.	2			
3	Общий вид критериев прочности. Частные случаи.	2			
4	Общие уравнения устойчивости элементов.	2			
5	Формы и решения для устойчивости пластин и оболочек.	2			
6	Особенности разрушения композитных элементов.	2			
7	Классическая теория пластин. Гипотеза Кирхгофа-Лява.	4			
8	Элементы теории оболочек. Разновидности дифференциальных уравнений для оболочек.	4			15
9	Уравнения теории анизотропных и слоистых пластин.	4			
10	Понятие о методе редуцированных коэффициентов (МРК). Решение нелинейных задач о несущей способности тонкостенных конструкций по МРК.	4			
11	Использование континуальных моделей при проектировании крыла, фюзеляжа и оперения ЛА.	2			
12	Развитие численных методов решения задач прикладной теории упругости.	2			
13	Основные понятия о методах конечных элементов (МКЭ).	4			
14	Простейшие типы и семейства конечных элементов.	4			

15	Скалярные и нормальные координаты. Высочоточные и согласованные семейства КЭ Сирендинова и Лагранжева типа.	4			
16	Метод подконструкций и суперэлементов.	2			
17	Особенности больших СЛАУ. Прямые и итерационные методы их решения.	2			
18	Нелинейные дискретные модели.	2			15
19	Типовые расчетные схемы МКЭ при исследовании авиаконструкций.	2			
20	Уравнения прикладной термоупругости в континуальном и дискретном виде.	2			
21	Пластические деформации, термоползучесть и термоустойчивость неравномерно нагретых конструкций.	4			
22	Краткое подведение итогов прочитанного курса.	2			
Итого часов		60			30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

1. Предмет курса. Основные разделы. Его роль и связи с другими курсами.

Предмет курса. Основные разделы. Его роль и связи с другими курсами. Требования к слушателям. Их специализация. Необходимая литература.

2. Основные понятия. Континуальные и дискретные модели прикладной теории упругости.

Основные понятия. Континуальные и дискретные модели прикладной теории упругости. Специфика тонкостенных авиаконструкций. Виды и роль расчетных методов. Многоуровневость напряженно-деформированного состояния. Главные гипотезы. Линейные и нелинейные модели. Виды нелинейностей.

3. Общий вид критериев прочности. Частные случаи.

Общий вид критериев прочности. Частные случаи. Особенности моделей и методов для композитных и термонапряженных конструкций. Учет концентраторов, соединений и комбинированного нагружения. Разрушение при сжатии и сдвиге. Устойчивость по Эйлеру.

4. Общие уравнения устойчивости элементов.

Общие уравнения устойчивости элементов. Решения для подкрепленной панели. Общая и местная потеря устойчивости.

5. Формы и решения для устойчивости пластин и оболочек.

Формы и решения для устойчивости пластин и оболочек. Учет пластических деформаций по Шенли. Понятие о закритическом деформировании.

6. Особенности разрушения композитных элементов.

Особенности разрушения композитных элементов. Критерии прочности КМ в напряжениях и деформациях. Влияние повреждений.

7. Классическая теория пластин. Гипотеза Кирхгофа-Лява.

Классическая теория пластин. Гипотеза Кирхгофа-Лява. Распространение на анизотропные и конструктивно-ортоотропные пластины. Частные случаи и примеры решения задач изгиба пластин.

8. Элементы теории оболочек. Разновидности дифференциальных уравнений для оболочек.

Элементы теории оболочек. Разновидности дифференциальных уравнений для оболочек. Безмоментные оболочки. Краевые эффекты. Решение для цилиндрической оболочки.

9. Уравнения теории анизотропных и слоистых пластин.

Уравнения теории анизотропных и слоистых пластин. Нелинейные уравнения Кармана. Их приближенные решения.

10. Понятие о методе редуционных коэффициентов (МРК). Решение нелинейных задач о несущей способности тонкостенных конструкций по МРК.

Понятие о методе редуционных коэффициентов (МРК). Решение нелинейных задач о несущей способности тонкостенных конструкций по МРК. Приближенные формулы Кармана и Маргерра для сжатых пластин. Теория Вагнера и Куна при сдвиге.

11. Использование континуальных моделей при проектировании крыла, фюзеляжа и оперения ЛА.

Описание использования континуальных моделей при проектировании крыла, фюзеляжа и оперения ЛА.

Семестр: 2 (Весенний)

12. Развитие численных методов решения задач прикладной теории упругости.

Развитие численных методов решения задач прикладной теории упругости. Основные представления о сеточных методах, интегро-интерполяционном и вариационно-разностном подходах.

13. Основные понятия о методах конечных элементов (МКЭ).

Основные понятия о методах конечных элементов (МКЭ). Вывод основных соотношений МКЭ в матрично-векторной форме. Преимущества и условия сходимости метода.

14. Простейшие типы и семейства конечных элементов.

Простейшие типы и семейства конечных элементов. Моментные элементы. Примеры стержня, треугольника и балки.

15. Скалярные и нормальные координаты. Высокоточные и согласованные семейства КЭ Сирендинова и Лагранжева типа.

Скалярные и нормальные координаты. Высокоточные и согласованные семейства КЭ Сирендинова и Лагранжева типа. Изопараметрические конечные элементы. Преобразования координат.

16. Метод подконструкций и суперэлементов.

Описание метода подконструкций и суперэлементов. Редуцирование основной системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) МКЭ.

17. Особенности больших СЛАУ. Прямые и итерационные методы их решения.

Особенности больших СЛАУ. Прямые и итерационные методы их решения. Алгоритмы и требуемые ресурсы при реализации на ЭВМ. Точность решения.

18. Нелинейные дискретные модели.

Нелинейные дискретные модели. Методы решения. МКЭ в задачах устойчивости.

19. Типовые расчетные схемы МКЭ при исследовании авиаконструкций.

Типовые расчетные схемы МКЭ при исследовании авиаконструкций. Программное обеспечение.

20. Уравнения прикладной термоупругости в континуальном и дискретном виде.

Уравнения прикладной термоупругости в континуальном и дискретном виде. Методы определения температурных полей и напряжений.

21. Пластические деформации, термоползучесть и термоустойчивость неравномерно нагретых конструкций.

Пластические деформации, термоползучесть и термоустойчивость неравномерно нагретых конструкций. Численное решение уравнений теплопроводности и лучистого теплообмена. Особенности прочностного расчета термонапряженных элементов.

22. Краткое подведение итогов прочитанного курса.

Краткое подведение итогов прочитанного курса. Задачи и перспективы развития ПТУ. Консультация по содержанию курса и литературе.

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

Желательно наличие в аудитории компьютера с видеопроектором.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Прикладная теория упругости [Текст] = Applied elasticity/Ван Цзи - де , -М., Физматгиз, 1959
2. Теория тонких оболочек [Текст]/В. В. Новожилов, -Л., Судпромгиз, 1951
3. Устойчивость упругих систем [Текст]/А. С. Вольмир, -М., Физматлит, 1963
4. Механика тонкостенных конструкций. Статика [Текст]/В. Л. Бидерман, -М., Машиностроение, 1977

Дополнительная литература

1. Механика конструкций из композиционных материалов [Текст], сборник трудов IV симпозиума по механике конструкций из композиционных материалов/отв. ред. Ю. В. Немировский , -Новосибирск, Наука, 1984
2. Прочность и устойчивость элементов тонкостенных конструкций [Текст], сборник статей/под ред. Е. Н. Тихомирова, -М., Машиностроение, 1967

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)

На лекциях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций и примеров, необходимо освоение комплекса программ NASTRAN.

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

Студент, изучающий дисциплину Прикладная теория упругости, 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;
- подготовку к дифференцированному зачету и 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:	Авиационные технологии Физтех-школа авиационных и цифровых технологий кафедра прочности летательных аппаратов
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: Г.Н. Замула, д-р техн. наук, профессор, профессор

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Прикладная теория упругости » обучающийся должен:

знать:

- континуальные и дискретные модели и методы прикладной теории упругости, в т. ч. для композитных и «горячих» конструкций.

уметь:

- использовать полученные знания при решении практических и новых задач, дальнейших исследованиях по развитию науки о прочности ЛА;
- правильно оценивать полученные результаты работ, предлагать инновационные и оптимальные решения.

владеть:

- навыками и методами решения задач ПТУ;
- навыками построения новых моделей и расчетных схем для конкретных авиаконструкций;
- опытом работы с новой информацией и литературой по дисциплине, в т. ч. на английском языке.

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

1. Шимми. Расчет колес ЛА на шимми. Бафтинг.
2. Колебания при полете в неспокойном воздухе, взлете и посадке. "Маховая тряска".
3. Колебания несущих винтов. «Земной резонанс».
4. Динамическая прочность воздушного винта.
5. Расчет частот и форм собственных изгибных и крутильных колебаний лопасти.
6. Диаграмма Кэмпбелла. Колебания ракет.
7. Взаимодействие упругих колебаний корпуса и перемещения жидкого топлива в баках.
8. Эксперимент на динамически подобных моделях в аэродинамических трубах.
9. Частотные испытания. Жесткостные испытания.
10. Методы измерения вибраций ЛА в полете.
11. Теория частотных испытаний. Одноточечное и многоточечное возбуждение.
12. Схематизация конструкции ЛА.
13. Балочная схематизация ракет и самолетов с крыльями большого удлинения.
14. Уравнения колебаний свободного самолета.

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

1. Виды и особенности упругих колебаний летательных аппаратов. Колебания упругого самолета с системой автоматического управления.
2. Изгибные упругие колебания балки постоянного поперечного сечения.
3. Изгибная жесткость. "Крутильная" жесткость (по Бредту). Центр изгиба. Ось жесткости. Уравнения изгибных и крутильных колебаний стержней.
4. Метод заданных форм. Методы Бубнова-Галеркина, Ритца в задачах об упругих колебаниях.
5. Уравнения собственных и вынужденных колебаний конструкций в матричной форме. Коэффициенты инерции и жесткости. Их свойства.
6. Формы и частоты собственных колебаний. Условия ортогональности форм колебаний.
7. Вынужденные колебания систем без трения. Резонанс.
8. Вынужденные колебания систем с линейным трением. Амплитудный и фазовый резонансы. Передаточные функции.
9. Понятие о методах исследования упругих колебаний летательных аппаратов (ЛА). Теоретические методы исследования аэроупругого взаимодействия ЛА с САУ с применением ЦВМ.
10. Метод сосредоточенных масс. Функция влияния. Уравнения Лагранжа для системы с n степенями свободы.
11. Собственные колебания систем с линейным трением. Физическая природа рассеяния энергии при колебаниях конструкций. Логарифмический декремент колебаний.
12. Флаттер. Флаттер прямого консольно защемленного крыла. Изгибно-крутильный флаттер крыла. Методы и средства предотвращения флаттера.

Билет 1

Учет при исследовании упругих колебаний степеней свободы самолета как жесткого тела.

Билет 2

«Нулевые тона» собственных колебаний свободного самолета. Акустические вибрации.

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.

Зачет 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.

Незачет 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.

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

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

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