

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

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

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Обеспечение безопасности эксплуатации летательных аппаратов по условиям прочности
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии передовая инженерная школа радиолокации, радионавигации и программной инженерии кафедра прочности летательных аппаратов
<b>курс:</b>	2
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - 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

Программа обсуждена на заседании кафедры прочности летательных аппаратов 04.06.2020

## Аннотация

Программа "Обеспечение безопасности эксплуатации летательных аппаратов по условиям прочности" 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-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
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные понятия обеспечения безопасности по условиям: статической и тепловой прочности; аэроупругости; усталостной прочности и живучести в условиях эксплуатации;
- понятия о сертификационном базисе и процессе сертификации по условиям прочности;
- методы и средства обеспечения летной годности ЛА в процессе 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.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов эксперимента и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

#### 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.	2			1
2	Основные понятия. Континуальные и дискретные модели прикладной теории упругости.	2			1
3	Общий вид критериев прочности. Частные случаи.	2			6
4	Формы и решения для устойчивости пластин и оболочек.	2			2
5	Особенности разрушения композитных элементов. Критерии прочности КМ	4			6
6	Классическая теория пластин. Гипотеза Кирхгофа-Лява.	4			2
7	Элементы теории оболочек. Разновидности дифференциальных уравнений для оболочек.	4			6
8	Уравнения теории анизотропных и слоистых пластин.	4			2
9	Понятие о методе редуцированных коэффициентов (МРК). Решение нелинейных задач о несущей способности тонкостенных конструкций по МРК.	4			2
10	Использование континуальных моделей при проектировании крыла, фюзеляжа и оперения ЛА.	4			
11	Развитие численных методов решения задач прикладной теории упругости.	4			
12	Основные понятия о методах конечных элементов (МКЭ). Вывод основных соотношений МКЭ	4			
13	Простейшие типы и семейства конечных элементов.	4			

14	Скалярные и нормальные координаты. Высокоточные и согласованные семейства КЭ Сирендинова и Лагранжева типа.	4			
15	Метод подконструкций и суперэлементов.	4			
16	Особенности больших СЛАУ. Прямые и итерационные методы их решения.	4			1
17	Типовые расчетные схемы МКЭ при исследовании авиаконструкций.	4			1
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: 3 (Осенний)

##### 1. Предмет курса.

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. 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.

##### 5. Особенности разрушения композитных элементов. Критерии прочности КМ

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

##### 6. Классическая теория пластин. Гипотеза Кирхгофа-Лява.

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

##### 7. Элементы теории оболочек. Разновидности дифференциальных уравнений для оболочек.

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

#### 8. Уравнения теории анизотропных и слоистых пластин.

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

#### 9. 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.

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

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

#### 11. 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.

#### 12. Основные понятия о методах конечных элементов (МКЭ). Вывод основных соотношений МКЭ

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

#### 13. Простейшие типы и семейства конечных элементов.

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

#### 14. 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.

#### 15. Метод подконструкций и суперэлементов.

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

#### 16. 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.

#### 17. Типовые расчетные схемы МКЭ при исследовании авиаконструкций.

Типовые расчетные схемы МКЭ при исследовании авиаконструкций. Программное обеспечение.

## **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. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 7 : Теория упругости : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— 4-е изд., испр. и доп. — М. : Наука, 1987 .— 248 с.

Дополнительная литература

## **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 "Обеспечение безопасности эксплуатации ЛА по условиям прочности", 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.

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.

Необходимы глубокие знания по теоретической механике, теории упругости, вариационным и численным методам, основам материаловедения и проектирования, а также опыт работы и программирования на ЭВМ.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Авиационные технологии передовая инженерная школа радиолокации, радионавигации и программной инженерии кафедра прочности летательных аппаратов
<b>курс:</b>	2
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	Г.Н. Замула, д-р техн. наук, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Обеспечение безопасности эксплуатации летательных аппаратов по условиям прочности» обучающийся должен:

### знать:

- основные понятия обеспечения безопасности по условиям: статической и тепловой прочности; аэроупругости; усталостной прочности и живучести в условиях эксплуатации;
- понятия о сертификационном базисе и процессе сертификации по условиям прочности;
- методы и средства обеспечения летной годности ЛА в процессе 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.

### владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы в лаборатории и Интернете;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- навыками грамотной обработки результатов эксперимента и сопоставления с теоретическими данными;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

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

1. Расчетные случаи нагружения конструкции ЛА.
2. Методы и средства обеспечения летной годности ЛА в процессе эксплуатации.
3. Отечественная система нормативно-технической документации по прочности авиационных конструкций.
4. Зарубежные нормативные требования к прочности конструкции воздушных судов.
5. Основные отличия отечественных и зарубежных нормативных требований и процедур сертификации.
6. Расчетные и экспериментальные исследования для обеспечения прочности авиационных конструкций на различных этапах разработки, изготовления и испытаний.
7. Основные требования к проведению наземных и летных испытаний по прочности.
8. Организация работ по поддержанию летной годности воздушных судов по условиям прочности в процессе эксплуатации.

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



1. Проблемы прочности и их место в общей задаче обеспечения безопасности эксплуатации и надежности авиационной техники.
2. Принципы обеспечения требуемого уровня безопасности и надежности авиационной техники по условиям статической прочности.
3. Методы обеспечения безопасности конструкции ЛА по условиям тепловой прочности.
4. Обеспечение безопасности ЛА по условиям аэроупругости.
5. Методы обеспечения безопасности по условиям усталостной прочности и живучести в условиях эксплуатации.
6. Понятия о сертификационном базисе и процессе сертификации по условиям прочности.
7. Нормы прочности и методы определения соответствия нормативным требованиям.

#### Билет 1

Отечественная система нормативно-технической документации по прочности авиационных конструкций.

#### Билет 2

Зарубежные нормативные требования к прочности конструкции воздушных судов.

### 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, конспектами лекций.

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