



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ДВАЖДЫ ГЕРОЯ
СОВЕТСКОГО СОЮЗА, ЛЕТЧИКА-КОСМОНАВТА А.А. ЛЕОНОВА»

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора

А.В. Троицкий

«___» _____ 2023 г.

**ИНСТИТУТ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

КАФЕДРА РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ (ИМАШ РАН, базовая кафедра)

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ
«РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»**

Специальность: 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов

Специализация №21: Производство и технологическая отработка изделий ракетно-космической техники

Уровень высшего образования: специалитет

Квалификация (степень) выпускника: инженер

Форма обучения: очная, очно-заочная

Королёв
2023

Рабочая программа является составной частью основной профессиональной образовательной программы и проходит рецензирование со стороны работодателей в составе основной профессиональной образовательной программы. Рабочая программа актуализируется и корректируется ежегодно.

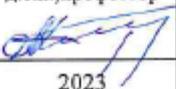
Автор: д.т.н., в.н.с. Евдокимов А.П. Рабочая программа дисциплины: «Расчет тонкостенных конструкций» – Королев МО: «Технологический университет», 2023.

Рецензент: д.т.н., профессор Матвиенко Ю.Г.

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» и Учебного плана, утвержденного Ученым советом Университета.

Протокол № 9 от 11.04.2023 г.

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры:

Заведующий кафедрой (ФИО, ученая степень, звание, подпись)	Матвиенко Ю.Г. д.т.н., профессор 				
Год утверждения (переподтверждения)	2023	2024	2025	2026	2027
Номер и дата протокола заседания кафедры	№ 9 от 28.03.2023г.	№ __ от __. __.20__г.			

Рабочая программа согласована:

Руководитель ОПОП ВО  Мороз А.П., д.т.н., с.н.с.

Рабочая программа рекомендована на заседании УМС:

Год утверждения (переподтверждения)	2023	2024	2025	2026	2027
Номер и дата протокола заседания УМС	№ 5 от 11.04.2023г.	№ __ от __. __.20__г.			

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с планируемыми результатами освоения ОПОП ВО

Цель курса - овладение теоретическими основами моделирования и расчета на прочность и устойчивость тонкостенных конструкций, являющихся на сегодняшний день инновационными и, соответственно, испытывающие проблемы и пробелы в теоретической фундаментальной базе, в частности – необходимости использования Еврокода-3. Главная особенность курса – наличие конкретных примеров по расчету рассматриваемого типа конструкций.

В процессе обучения студент приобретает и совершенствует следующие компетенции.

Общепрофессиональные компетенции:

ОПК-2. Способен понимать принципы работы современные информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности.

Профессиональные компетенции:

ПК-1. Способен проводить теоретические и экспериментальные исследования в области создания новых образцов космической техники в соответствии с тактико-техническими характеристиками и техническим заданием;

ПК-2. Способность проектировать космические аппараты, космические системы и их составные части.

Основными задачами дисциплины являются:

- овладение основами математической теории упругости, прикладной теории пластичности, ползучести;
- приобретение практического опыта по применению основных математических методов теоретического решения задач прикладной теории упругости, теории малых упругопластических деформаций и оценки прочности тонкостенных пластин и оболочек;
- знакомство с современными методами расчёта на прочность, исходный и остаточный ресурс, риски и безопасность.

Показатель освоения компетенции отражают следующие индикаторы:

Трудовые действия:

- Разработка рекомендаций и заключений по использованию результатов теоретических и экспериментальных исследований космических аппаратов, космических систем и их составных частей.;
- Выполнять расчеты с использованием специализированного ПО;
- Анализировать перспективы развития как ракетно-космической техники в целом, так и ее отдельных видов для проработки технических заданий.

- Владеет навыками применения современных информационных технологий и программных средств, в том числе отечественного производства, при решении задач профессиональной деятельности.

Необходимые умения:

- Умеет выбирать современные информационные технологии и программные средства, в том числе отечественного производства при решении задач профессиональной деятельности;

- Умеет решать стандартные профессиональные задачи с применением естественнонаучных и общинженерных знаний, методов математического анализа и моделирования;

- Уметь: применять на практике математические и физические модели, методы и средства проектирования и автоматизации инженерных задач.

- Разработка рекомендаций и заключений по использованию результатов теоретических и экспериментальных исследований космических аппаратов, космических систем и их составных частей.

- Проведение анализа вариантов технических решений при разработке проектов космических аппаратов, космических систем и их составных частей.

Необходимые знания:

- Знает современные информационные технологии и программные средства, в том числе отечественного производства при решении задач профессиональной деятельности;

- Знать основы инженерного синтеза сложных систем, аналитический аппарат и алгоритмы приложения в технике.;

- Знать основы метрологии, стандартизации и сертификации;

- Знать Единую систему конструкторской документации; особенности инженерно-технического подхода к решению профессиональных проблем.

2. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина относится к базовой части блока 1 адаптированной профессиональной образовательной программы подготовки по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов».

При очной форме обучения дисциплина реализуется на 4-ом курсе в 7-ом семестре кафедрой «Ракетная техника (ИМАШ РАН, базовая кафедра)».

При очно-заочной форме обучения дисциплина реализуется на 4-ом курсе в 8-ом семестре кафедрой «Ракетная техника (ИМАШ РАН, базовая кафедра)».

Дисциплина базируется на дисциплинах: «Физика», «Теоретическая механика», «Высшая математика», «Материаловедение», «Сопrotивление материалов», «Детали машин», «Строительная механика ракет» и ранее частично изученных компетенциях УК-1, УК-2, УК-6, УК-8, ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-8, ПК-1, ПК-2, ПК-7.

Знания и компетенции, полученные при освоении дисциплины «Расчёт

тонкостенных конструкций», являются базовыми при изучении дисциплин: «Расчет, конструкция и проектирование ракетных двигателей», «Математические модели функционирования ракетно-космических систем и комплексов», «Моделирование технологических процессов», а также ряда профессиональных дисциплин специальности и выполнения выпускной квалификационной работы инженера.

3. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины для студентов очной формы составляет 3 зачетные единицы, 108 часов.

Таблица 1

Виды занятий	Всего часов	Семестр 8	Семестр ...	Семестр ...	Семестр ...
Общая трудоемкость	108	108			
ОЧНАЯ ФОРМА ОБУЧЕНИЯ					
Аудиторные занятия	32	32			
Лекции (Л)	16	16			
Практические занятия (ПЗ)	16	16			
Лабораторные работы (ЛР)	-	-			
Практическая подготовка	-	-			
Самостоятельная работа	76	76			
Курсовые работы (проекты)	-	-			
Расчетно-графические работы	-	-			
Контрольная работа	+	+			
Текущий контроль знаний	Тест	+			
Вид итогового контроля	Экзамен	Экзамен			
ОЧНО - ЗАОЧНАЯ ФОРМА ОБУЧЕНИЯ					
Аудиторные занятия	28	28			
Лекции (Л)	12	12			
Практические занятия (ПЗ)	16	16			
Лабораторные работы (ЛР)	-	-			
Практическая подготовка	-	-			
Самостоятельная работа	80	80			
Курсовые работы (проекты)	-	-			
Расчетно-графические работы	-	-			
Контрольная работа	+	+			
Вид итогового контроля	Экзамен	Экзамен			

4. Содержание дисциплины

4.1. Темы дисциплины и виды занятий

Таблица 2

Наименование тем	Лекции, час. очн/заочн	Практические занятия, час. очн/заочн	Лабораторные занятия, час очн/заочн	Занятия в интерактивной форме, час очн/заочн	Код Компетенций
Тема 1. Основы механики деформируемого твёрдого тела.	6/4	6/6	-	2/2	ОПК-2 ПК-1 ПК-2
Тема 2. Основы теории и расчёта тонкостенных пластин.	6/4	6/6	-	2/2	ОПК-2 ПК-1 ПК-2
Тема 3. Основы теории и расчёта тонкостенных оболочек.	4/4	4/4	-	4/4	ОПК-2 ПК-1 ПК-2
Итого:	16/12	16/16	-	8/8	

4.2. Содержание тем дисциплины

Тема 1. Основы механики деформируемого твёрдого тела.

Внешние силы и напряжения. Перемещения и деформации. Начало возможных перемещений и уравнения равновесия. Упругое поведение деформируемых тел. Принцип минимума полной потенциальной энергии. Устойчивое и неустойчивое равновесие деформированного тела.

Плоское напряжённое и плоское деформированное состояние. Обратная задача теории упругости. Плоская задача теории упругости в полярных координатах.

Вариационные методы решения задач теории упругости. Матричный метод начальных параметров. Метод конечных элементов.

Тема 2. Основы теории и расчёта тонкостенных пластин.

Классификация пластинок. Гипотезы Кирхгофа и уравнение Софи Жермен. Геометрические и физические уравнения пластинок. Уравнения изгиба тонкой пластинки. Внутренние усилия и моменты.

Дифференциальное уравнение изогнутой срединной поверхности пластинки. Условие на контуре пластинки. Прямоугольная пластинка, решение Навье. Прямоугольная пластинка, решение Леви. Расчёт прямоугольной пластинки и бесконечной полосы на упругом основании. Основные уравнения изгиба круглой пластинки.

Тема 3. Основы теории и расчёта тонкостенных оболочек.

Геометрия оболочек. Уравнения безмоментной теории. Осесимметричная задача для безмоментной оболочки. Уравнения моментной теории оболочек. Расчёт пологой сферической оболочки. Деформация цилиндрических оболочек. Полубезмоментная теория цилиндрических оболочек. Расчёты оболочек по предельным нагрузкам.

Основные уравнения устойчивости цилиндрической оболочки. Устойчивость цилиндрической оболочки при осевом сжатии. Устойчивость цилиндрической оболочки при внешнем давлении. Устойчивость цилиндрической оболочки при кручении и поперечном изгибе.

Расчёт оболочек матричным методом начальных параметров. Расчёт методом конечных разностей. Расчёт методом конечных элементов. Численное решение задач устойчивости оболочек.

5. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы по дисциплине

1. Рабочая тетрадь.
2. Практикум на кафедре.
3. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины «Расчет тонкостенных конструкций»

Целью лекций является изложение теоретического материала и иллюстрация его примерами и задачами.

Цель практических занятий состоит в закреплении материала лекций и выработке умения работать с конкретными методами проектирования и конструирования.

Самостоятельные занятия студентов проводятся в соответствии с программой по дисциплине «Теории механизмов и машин» и заданиями преподавателя с помощью базовых учебников и специальной учебно-методической литературы.

Самостоятельная работа студентов состоит:

- в расширении знаний по дисциплине путем изучения и анализа учебной и периодической литературы;
- в подготовке выступлений на практических занятиях;
- в выступлениях с докладами на ежегодных студенческих конференциях;
- в выполнении контрольных работ;

- в выполнении расчетно-графической работы.

6. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Структура фонда оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине «Расчёт тонкостенных конструкций» приведена в Приложении 1 к настоящей рабочей программе.

7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Основная литература:

1. Новожилов В.В. Линейная теория тонких оболочек. - М.: ЁЁ Медиа, 2012. – 565 с.
2. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. - М.: ЛЕНАНД, 2017. – 496 с.
3. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: URSS, 2009. – 609 с.
4. Амосов А.А. Техническая теория тонких упругих оболочек. - М.: МГСУ, 2009. 304 с.

Дополнительная литература:

1. Аверьянов А.П. Введение в ракетно-космическую технику. Ракеты. Ч. 2 - Королёв М.О.: КИУЭС, 2011. – 210 с.
2. Погорелов В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 640 с.
3. Колкунов Н.В. Основы расчёта упругих оболочек. - М.: Высшая школа, 1972. – 296 с.
4. Шапошников, Н.Н. Строительная механика : учебник / Н.Н. Шапошников, Р.Х. Кристалинский, А.В. Дарков ; под общей редакцией Н.Н. Шапошникова. — 14-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 692 с. — ISBN 978-5-8114-0576-3. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/105987> (дата обращения: 03.03.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

Интернет-ресурсы:

1. www.biblioclub.ru
2. www.rucont.ru
3. www.znaniium.com
4. www.e.lanbook.com

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины приведены в Приложении 2 к настоящей программе.

10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Перечень программного обеспечения: *MSOffice, Excel, ANSYS, SolidWorks, MathCAD.*

Информационные справочные системы: Электронные ресурсы образовательной среды университета

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

Лекционные занятия:

- аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран); доской для письма мелом или фломастерами;
- комплект электронных презентаций/слайдов.

Практические занятия:

- аудитория, оснащённая мультимедийными средствами (проектор, ноутбук), демонстрационными материалами (наглядными пособиями); доской для письма мелом или фломастерами;
- рабочее место преподавателя, оснащённое компьютером с доступом в Интернет;
- рабочее место студента, оснащённое компьютером с доступом в Интернет.

ИНСТИТУТ ТЕХНИКИ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ФАКУЛЬТЕТ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ
ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ
КАФЕДРА РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ (ИМАШ РАН, базовая кафедра)

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО
ДИСЦИПЛИНЕ
«РАСЧЁТ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

(Приложение 1 к рабочей программе)

Специальность: 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов

Специализация №21: Производство и технологическая отработка изделий ракетно-космической техники

Уровень высшего образования: специалитет

Квалификация (степень) выпускника: инженер

Форма обучения: очная, очно-заочная

Королёв
2023

1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы

№ п/п	Индекс компетенции	Содержание компетенции (или ее части)*	Раздел дисциплины, обеспечивающий формирование компетенции (или ее части)	В результате изучения раздела дисциплины, обеспечивающего формирование компетенции, обучающийся приобретает:		
				Трудовые действия	Необходимые умения	Необходимые знания
1	ОПК-2	Способен понимать принципы работы современных информационных технологий и использовать их для решения задач профессиональной деятельности	Темы 1-3.	Владеет навыками применения современных информационных технологий и программных средств, в том числе отечественного производства, при решении задач профессиональной деятельности	Умеет выбирать современные информационные технологии и программные средства, в том числе отечественного производства при решении задач профессиональной деятельности	Знает современные информационные технологии и программные средства, в том числе отечественного производства при решении задач профессиональной деятельности

2	ПК-1	Способен проводить теоретические и экспериментальные исследования в области создания новых образцов космической техники в соответствии с тактико-техническими характеристикам и и техническим заданием;	Темы 1-3.	Анализировать перспективы развития как ракетно-космической техники в целом, так и ее отдельных видов для проработки технических заданий.	Разработка рекомендаций и заключений по использованию результатов теоретических и экспериментальных исследований космических аппаратов, космических систем и их составных частей.	Знать основы метрологии, стандартизации и сертификации. Знать Единую систему конструкторской документации; особенности инженерно-технического подхода к решению профессиональных проблем
---	------	---	-----------	--	---	--

3	ПК-2	Способность проектировать космические аппараты, космические системы и их составные части	Темы 1-3.	Выполнять расчеты с использованием специализированного ПО	Проведение анализа вариантов технических решений при разработке проектов космических аппаратов, космических систем и их составных частей.	Знать основы инженерного синтеза сложных систем, аналитический аппарат и алгоритмы приложения в технике. Знать основы систем автоматизированного проектирования
---	------	--	-----------	---	---	---

2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования, описание шкал оценивания

Код компетенции	Инструменты, оценивающие сформированность компетенции	Показатель оценивания компетенции	Критерии оценки
ОПК-2 ПК-1 ПК-2	Письменное задание	<p>А) полностью сформирована (компетенция освоена на <u>высоком</u> уровне) – 5 баллов</p> <p>Б) частично сформирована:</p> <ul style="list-style-type: none"> компетенция освоена на <u>продвинутом</u> уровне – 4 балла; компетенция освоена на <u>базовом</u> уровне – 3 балла; <p>В) не сформирована</p>	<p>Проводится в письменной форме</p> <ol style="list-style-type: none"> Выбор оптимального метода решения задачи (1 балл) Умение применить выбранный метод (1 балл) Логический ход решения правильный, но имеются арифметически в расчетах (1 балл) Решение задачи и получение правильного результата (2 балла) Задача не решена вообще (0 баллов) <p>Максимальная оценка - 5 баллов.</p>

		(компетенция не сформирована) – 2 и менее баллов	<p>Время отведенное на процедуру – до 40 мин.</p> <p>Результаты оценочной процедуры представляются обучающимся в срок не позднее 1 недели после проведения процедуры – для текущего контроля. Оценка проставляется в электронный журнал</p>
--	--	--	---

3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы

Темы докладов и дискуссионных вопросов

1. Упругое поведение деформируемых тел.
2. Обратная задача теории упругости.
3. Вариационные методы в теории упругости.
4. Метод конечных разностей.
5. Геометрия оболочек.
6. Расчёт пологой сферической оболочки.
7. Энергетический метод исследования устойчивости пластин.
8. Устойчивость цилиндрической оболочки при осевом сжатии.
9. Расчёт оболочек матричным методом начальных параметров.
10. Расчёт оболочек методом конечных элементов.

Примерная тематика рефератов

1. Устойчивое и неустойчивое равновесие деформированного тела.
2. Осесимметричный изгиб круглых колец.
3. Матричный метод начальных параметров.
4. Метод конечных элементов.
5. Расчёт круглых сплошных и кольцевых пластин.
6. Методы Кирхгофа-Лява и Ритца-Тимошенко при исследовании прочности тонкостенных пластин.
7. Осесимметричная задача для безмоментной оболочки.
8. Деформация цилиндрических оболочек.
9. Поведение стержней и пластин после потери устойчивости.
10. Устойчивость цилиндрической оболочки при кручении и поперечном изгибе.
11. Численное решение задач устойчивости оболочек.

4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Формой контроля знаний по дисциплине «Расчёт тонкостенных конструкций» являются две текущие аттестации в виде тестов и итоговая аттестация в виде экзамена.

Неделя текущего контроля	Вид оценочного средства	Код компетенций, оценивающий знания, умения, навыки	Содержание оценочного средства	Требования к выполнению	Срок сдачи (неделя семестра)	Критерии оценки по содержанию и качеству с указанием баллов
В соответствии с графиком учебного процесса	тестирование	ОПК-2 ПК-1 ПК-2	33 вопроса	Компьютерное тестирование; время, отведенное на процедуру - 40 минут	Результаты тестирования предоставляются в день проведения процедуры	Критерии оценки определяются процентным соотношением. Не явка - 0 Удовлетворительно - от 51% правильных ответов. Хорошо - от 70%. Отлично – от 90%. Максимальная оценка – 5 баллов
В соответствии с графиком учебного процесса	тестирование	ОПК-2 ПК-1 ПК-2	33 вопроса	Компьютерное тестирование; время, отведенное на процедуру – 40 минут	Результаты тестирования предоставляются в день проведения процедуры	Критерии оценки определяются процентным соотношением. Не явка - 0 Удовлетворительно - от 51% правильных ответов. Хорошо - от 70%. Отлично – от 90%. Максимальная оценка – 5 баллов
В соответствии с графиком учебного процесса	Экзамен	ОПК-2 ПК-1 ПК-2	3 вопроса	Экзамен проводится в письменной форме, путем ответа на вопросы. Время, отведенное на процедуру – 45 минут.	Результаты предоставляются в день проведения экзамена	Критерии оценки: «Отлично»: знание основных понятий предмета; умение использовать и применять полученные знания на практике; работа на практических занятиях; знание основных научных теорий, изучаемых предметов;

						<p>ответ на вопросы билета.</p> <p>«Хорошо»:</p> <ul style="list-style-type: none"> •знание основных понятий предмета; •умение использовать и применять полученные знания на практике; •работа на практических занятиях; •знание основных научных теорий, изучаемых предметов; •ответы на вопросы билета •неправильно решено практическое задание <p>«Удовлетворительно»:</p> <p>демонстрирует частичные знания по темам дисциплин;</p> <p>незнание, неумение использовать и применять полученные знания на практике;</p> <p>не работал на практических занятиях;</p> <p>«Неудовлетворительно»:</p> <p>демонстрирует частичные знания по темам дисциплин;</p> <p>незнание основных понятий предмета;</p> <p>неумение использовать и применять полученные знания на практике;</p> <p>не работал на практических занятиях;</p> <ul style="list-style-type: none"> • не отвечает на вопросы.
--	--	--	--	--	--	--

Итоговое начисление баллов по дисциплине осуществляется в соответствии с разработанной и внедренной балльно-рейтинговой системой контроля и оценивания уровня знаний и внеучебной созидательной активности обучающихся.

4.1. Типовые вопросы, выносимые на тестирование

1. Нормальные напряжения на октаэдрических площадках

$$(!) \quad \sigma_{окт} = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33});$$

$$(?) \quad \sigma_{окт} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2};$$

$$(?) \quad \sigma_{окт} = \sigma_{ij} l_j.$$

2. Касательные напряжения на октаэдрических площадках

$$(?) \quad \tau_{окт} = \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3);$$

$$(?) \quad \tau_{окт}^2 = |\sigma_v|^2 - \sigma_n^2;$$

$$(!) \quad \tau_{окт} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

3. Максимальные касательные напряжения

$$(?) \quad \tau_{\max} = \frac{1}{3}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]^{1/2};$$

$$(!) \quad \tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3);$$

$$(?) \quad \tau_{\max}^2 = |\sigma_v|^2 - \sigma_n^2.$$

4. Вековое уравнение для главных напряжений

$$(!) \quad S^3 - S^2 J_1 + S J_2 - J_3 = 0;$$

$$(?) \quad \sigma_{ij,j} + f_i = 0;$$

$$(?) \quad (1 + \nu)\Delta\sigma_{ij} + 3\sigma_{ij} = 0.$$

5. Первый инвариант тензора напряжений

$$(?) \quad J_1 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3;$$

$$(?) \quad J_1 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1;$$

$$(!) \quad J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3.$$

6. Второй инвариант тензора напряжений

$$(?) \quad J_2 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3;$$

$$(!) \quad J_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1;$$

$$(?) \quad J_2 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3.$$

7. Третий инвариант тензора напряжений

$$(!) \quad J_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3;$$

- (?) $J_3 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$;
 (?) $J_3 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$.

8. Первый инвариант тензора деформаций

- (?) $I_1 = \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1$;
 (?) $I_1 = \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3$;
 (!) $I_1 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$.

9. Второй инвариант тензора деформаций

- (?) $I_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$;
 (!) $I_2 = \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1$;
 (?) $I_2 = \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3$.

10. Третий инвариант тензора деформаций

- (?) $I_3 = \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1$;
 (?) $I_3 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$;
 (!) $I_3 = \varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3$.

11. Интенсивность напряжений

- (?) $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij}$;
 (?) $\sigma = \frac{\sigma_{ii}}{3} \equiv \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$;
 (!) $\sigma = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$.

12. Девиатор тензора напряжений

- (!) $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij}$;
 (?) $\sigma = \frac{\sigma_{ii}}{3} \equiv \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$;
 (?) $\sigma = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$.

13. Шаровая часть тензора напряжений

- (?) $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij}$;
 (!) $\sigma = \frac{\sigma_{ii}}{3} \equiv \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3}$;
 (?) $\sigma = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$.

14. Девиатор тензора деформаций

- (?) $I_2 = \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1$;
 (!) $y_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon\delta_{ij}$;
 (?) $\varepsilon = \frac{\varepsilon_{ii}}{3} \equiv \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3}$.

15. Шаровая часть тензора деформаций

- (?) $I_2 = \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3\varepsilon_1$;
 (?) $y_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon\delta_{ij}$;

$$(!) \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon_{ii}}{3} \equiv \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3}.$$

16. Интенсивность тензора деформаций

$$(?) \quad I_2 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_3 \varepsilon_1;$$

$$(?) \quad \gamma_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ji};$$

$$(!) \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right]^{1/2}.$$

17. Соотношения Коши

$$(!) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i});$$

$$(?) \quad \gamma_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j});$$

$$(?) \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right]^{1/2}.$$

18. Обобщённый закон Гука для изотропного тела

$$(!) \quad \sigma_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} + \lambda \theta \delta_{ij};$$

$$(?) \quad U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij};$$

$$(?) \quad \varepsilon_{ii,jj} + \varepsilon_{jj,ii} - 2\varepsilon_{ij,ij} = 0.$$

19. Обобщённый закон Гука для анизотропного тела

$$(!) \quad \sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{ij};$$

$$(?) \quad U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij};$$

$$(?) \quad \varepsilon_{ii,jj} + \varepsilon_{jj,ii} - 2\varepsilon_{ij,ij} = 0.$$

20. Формула Клайперона

$$(?) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left[\sigma_{ij} - \frac{3\nu}{1+\nu} \sigma \delta_{ij} \right];$$

$$(?) \quad \sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{ij};$$

$$(!) \quad U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}.$$

21. Уравнения Ламе

$$(?) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left[\sigma_{ij} - \frac{3\nu}{1+\nu} \sigma \delta_{ij} \right];$$

$$(?) \quad \sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{ij};$$

$$(!) \quad (\lambda + \mu) \theta_{,i} + \mu \Delta u_i + f_i = 0.$$

22. Уравнения Бельтрами-Митчела

$$(?) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left[\sigma_{ij} - \frac{3\nu}{1+\nu} \sigma \delta_{ij} \right];$$

$$(!) \quad (1 + \nu) \Delta \sigma_{ij} + 3\sigma_{,ij} = 0;$$

$$(?) \quad (\lambda + \mu) \theta_{,i} + \mu \Delta u_i + f_i = 0.$$

23. Теорема Клапейрона

$$(?) \quad \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left[\sigma_{ij} - \frac{3\nu}{1+\nu} \sigma \delta_{ij} \right];$$

$$(?) \quad U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij};$$

$$(!) \quad \int_F u_i \sigma_{ij} n_j dA + \int_V u_i f_i dV = 2 \int_V U dV.$$

24. Первая теорема Кастильяно

$$(!) \quad \frac{\partial U}{\partial r_k} = P_k, \quad \frac{\partial U}{\partial \varphi_n} = M_n;$$

$$(?) \quad \frac{\partial U}{\partial P_k} = r_k, \quad \frac{\partial U}{\partial M_n} = \varphi_n;$$

$$(?) \quad \int_F p_i^I u_i^II dF + \int_V f_i^I u_i^II dV = \int_F p_i^II u_i^I dF + \int_V f_i^II u_i^I dV.$$

25. Вторая теорема Кастильяно

$$(?) \quad \frac{\partial U}{\partial r_k} = P_k, \quad \frac{\partial U}{\partial \varphi_n} = M_n;$$

$$(!) \quad \frac{\partial U}{\partial P_k} = r_k, \quad \frac{\partial U}{\partial M_n} = \varphi_n;$$

$$(?) \quad \int_F p_i^I u_i^II dF + \int_V f_i^I u_i^II dV = \int_F p_i^II u_i^I dF + \int_V f_i^II u_i^I dV.$$

26. Теорема взаимности Бетти

$$(?) \quad \frac{\partial U}{\partial r_k} = P_k, \quad \frac{\partial U}{\partial \varphi_n} = M_n;$$

$$(?) \quad \frac{\partial U}{\partial P_k} = r_k, \quad \frac{\partial U}{\partial M_n} = \varphi_n;$$

$$(!) \quad \int_F p_i^I u_i^II dF + \int_V f_i^I u_i^II dV = \int_F p_i^II u_i^I dF + \int_V f_i^II u_i^I dV.$$

27. Уравнения совместности деформаций при плоском напряжённом состоянии

$$(?) \quad \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right);$$

$$(?) \quad \theta = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y};$$

$$(!) \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}.$$

28. Уравнения равновесия при плоской деформации

$$(?) \quad \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y};$$

$$(!) \quad \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} = 0;$$

$$(?) \quad \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right).$$

29. Функция напряжений Эри вводится соотношениями

$$(?) \theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y};$$

$$(!) \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right);$$

$$(?) \sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}.$$

30. Нормальные напряжения при изгибе пластин

$$(!) \sigma_{xx} = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \sigma_{yy} = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right);$$

$$(?) \sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0;$$

$$(?) \sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}.$$

31. При изгибе пластин моменты определяются формулами

$$(?) \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial x} + Q_y = 0;$$

$$(!) M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right);$$

$$(?) M_x = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), M_y = D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right).$$

32. Уравнение Софи Жермен

$$(?) \Delta^2 \Phi = 0;$$

$$(!) \Delta^2 w = \frac{q}{D};$$

$$(?) \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial x} + Q_y = 0.$$

33. Граничные условия на защемлённом краю пластины

$$(?) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Big|_{x=0} = 0, \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right) \Big|_{x=0} = 0;$$

$$(?) w \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0;$$

$$(!) w \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0.$$

34. Граничные условия на шарнирно опёртом краю пластины

$$(?) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Big|_{x=0} = 0, \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2-\nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right) \Big|_{x=0} = 0;$$

$$(!) w \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0;$$

$$(!) w \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0.$$

35. Граничные условия на свободном краю пластины

$$(!) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Big|_{x=0} = 0, \left(\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (2 - \nu) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right) \Big|_{x=0} = 0;$$

$$(?) w \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0;$$

$$(?) w \Big|_{x=0} = 0, \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0.$$

36. Максимальный прогиб пластины при синусоидальной нагрузке

$$(?) w = C_1 + C_2 x + C_3 x^2 + C_4 x^3 + w_0;$$

$$(!) w_0 = \frac{q_0}{\pi^4 D \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2};$$

$$(?) w_{mn} = \frac{q_{mn}}{\pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}.$$

37. Формула для прогибов пластины при решении в двойных тригонометрических рядах

$$(?) w = C_1 + C_2 x + C_3 x^2 + C_4 x^3 + w_0;$$

$$(?) w_0 = \frac{q_0}{\pi^4 D \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2};$$

$$(!) w_{mn} = \frac{q_{mn}}{\pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2}.$$

38. Дифференциальное уравнение пластины при решении в одинарных тригонометрических рядах

$$(?) \frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{q}{D};$$

$$(?) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q + q_R}{D};$$

$$(!) Y_m^{IV} - 2\lambda^2 Y_m'' + \lambda^4 Y_m = \frac{q_m(y)}{D}.$$

39. Дифференциальное уравнение для пластины на упругом основании

$$(?) \Delta^2 w = \frac{q}{D};$$

$$(!) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q + q_R}{D};$$

$$(?) Y_m^{IV} - 2\lambda^2 Y_m'' + \lambda^4 Y_m = \frac{q_m(y)}{D}.$$

40. Прогиб пластины на упругом основании

$$(?) w_0 = \frac{q_0}{\pi^4 D \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2};$$

$$(?) w_{mn} = \frac{q_{mn}}{\pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2};$$

$$(!) w_{mn} = \frac{q_{mn}}{\pi^4 D \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2 + \chi}.$$

41. Уравнения равновесия цилиндрической оболочки

$$(!) \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial s} + \bar{X} = 0; \frac{\partial S}{\partial s} + \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial M_\theta}{R \partial s} + \bar{Y} = 0; -\frac{S}{R} + \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_\theta}{\partial s^2} + \bar{Z} = 0$$

$$(?) \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial s} + \bar{X} = 0; \frac{\partial N}{\partial s} + \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial M_\theta}{R \partial s} + \bar{Y} = 0; -\frac{S}{R} + \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_\theta}{\partial s^2} + \bar{Z} = 0$$

$$(?) \frac{\partial N}{\partial s} + \frac{\partial T}{\partial x} + \bar{X} = 0; \frac{\partial S}{\partial s} + \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial M_\theta}{R \partial s} + \bar{Y} = 0; \frac{S}{R} + \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_\theta}{\partial s^2} + \bar{Z} = 0.$$

42. Кривизна оболочки

$$(?) \rho_x = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}; \rho_\theta = -\frac{\partial v}{R \partial \theta} + \frac{\partial^2 w}{\partial s^2}$$

$$(!) \rho_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \rho_\theta = -\frac{\partial v}{R \partial s} + \frac{\partial^2 w}{\partial s^2}$$

$$(?) \rho_x = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \rho_\theta = -\frac{\partial v}{R \partial s} + \frac{\partial^2 u}{\partial s^2}$$

43. Удлинения и изменение угла по поверхности оболочки

$$(!) \bar{\varepsilon}_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \bar{\varepsilon}_\theta = \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{w}{R}; \gamma = \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$(?) \bar{\varepsilon}_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \bar{\varepsilon}_\theta = \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{w}{R}; \gamma = \frac{\partial u}{\partial \gamma} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$(?) \bar{\varepsilon}_x = \frac{\partial v}{\partial x}; \bar{\varepsilon}_\theta = \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{w}{R}; \gamma = \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

44. Перемещения по оси Z длинной цилиндрической оболочки

$$(?) w = -\frac{R}{Ec} \cdot \frac{(5\xi_l^4 - 6\xi_l^2 \xi^2 + \xi^4)}{24} (C_1 \cos \theta - C_2 \sin \theta + C_3)$$

$$(?) w = -\frac{R}{Ec} \cdot \frac{(3\xi_l^2 - \xi^2)\xi}{6} (C_1 \sin \theta + C_2 \cos \theta + C_3 \theta + C_4)$$

$$(!) w = +\frac{R}{Ec} \cdot \frac{(5\xi_l^4 - 6\xi_l^2 \xi^2 + \xi^4)}{24} (-C_1 \sin \theta - C_2 \cos \theta)$$

45. Нормальные усилия в продольном и поперечном направлении оболочки

$$(?) N = \frac{Ec}{1+\mu^2} (\bar{\varepsilon}_x + \mu \bar{\varepsilon}_\theta); S = \frac{Ec}{1-\mu^2} (\bar{\varepsilon}_\theta - \mu \bar{\varepsilon}_x)$$

$$(?) N = \frac{Ec}{1+\mu^2} (\bar{\varepsilon}_x - \mu \bar{\varepsilon}_\theta); S = \frac{Ec}{1-\mu^2} (\bar{\varepsilon}_\theta - \mu \bar{\varepsilon}_x)$$

$$(!) N = \frac{Ec}{1-\mu^2} (\bar{\varepsilon}_x + \mu \bar{\varepsilon}_\theta); S = \frac{Ec}{1-\mu^2} (\bar{\varepsilon}_\theta + \mu \bar{\varepsilon}_x)$$

46. Сдвигающее усилие и изгибающие моменты оболочки

$$(?) T = G\nu\gamma; M_x = D(\rho_x + \mu\rho_\theta); M_\theta = D(\rho_\theta + \mu\rho_x)$$

$$(!) T = Gc\gamma; M_x = -D(\rho_x + \mu\rho_\theta); M_\theta = -D(\rho_\theta + \mu\rho_x)$$

$$(?) T = G\mu\gamma; M_x = D(\rho_x + c\rho_\theta); M_\theta = -E(\rho_\theta + \mu\rho_x)$$

47. Продольное усилие длинной цилиндрической оболочки

$$(!) N = -\frac{1}{2}(\xi_l^2 - \xi^2)(C_1 \sin \theta + C_2 \cos \theta + C_3 \theta + C_4)$$

$$(?) N = -\frac{1}{4}(\xi_l^4 - \xi^4)(C_1 \sin \theta + C_2 \cos \theta + C_3 \theta + C_4)$$

$$(?) N = -\frac{1}{4}(\xi_l^2 - \xi^2)(C_1 \cos \theta + C_2 \sin \theta + C_3 \theta + C_4)$$

48. Уравнение равновесия элементарного объёма для полого толстостенного цилиндра

$$(?) \sigma_\theta - \sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0$$

$$(!) \sigma_r - \sigma_\theta + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0$$

$$(?) \sigma_r + \sigma_\theta - r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = 0$$

49. Физические уравнения элементарного объёма для полого толстостенного цилиндра

$$(?) \varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_r); \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta + \mu\sigma_r)$$

$$(?) \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_r + \mu\sigma_\theta); \varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta)$$

$$(!) \varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_\theta); \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_r)$$

50. Изгибающие моменты резервуара

$$(?) M = \frac{Ec}{\alpha^2 R^2} F_3 u_0 + \frac{Ec}{\alpha^3 R^2} F_4 \gamma_0 + F_1 M_0 + \frac{1}{\alpha} F_2 Q_0 + \frac{\mu}{\alpha^2} \left(\frac{F_4}{\alpha} - h F_3 \right)$$

$$(!) M = \frac{Ec}{\alpha^2 R^2} F_3 w_0 + \frac{Ec}{\alpha^3 R^2} F_4 \varphi_0 + F_1 M_0 + \frac{1}{\alpha} F_2 Q_0 + \frac{\gamma}{\alpha^2} \left(\frac{F_4}{\alpha} - h F_3 \right)$$

$$(?) M = \frac{Qc}{\alpha^2 R^2} F_3 w_0 + \frac{Qc}{\alpha^3 R^2} F_4 \varphi_0 + F_1 T_0 + \frac{1}{\alpha} F_2 T_0 + \frac{\gamma}{\alpha^2} \left(\frac{F_4}{\alpha} - h F_3 \right)$$

4.2. Типовые вопросы, выносимые на экзамен

1. Перемещения и деформации.
2. Начало возможных перемещений и уравнения равновесия.
3. Упругое поведение деформируемых тел.
4. Принцип минимума полной потенциальной энергии.
5. Устойчивое и неустойчивое равновесие деформированного тела.
6. Плоская задача теории упругости в полярных координатах.
7. Осесимметричный изгиб круглых пластин.
8. Дифференциальное уравнение изгиба пластин в прямоугольной системе координат.
9. Вариационные методы.
10. Матричный метод начальных параметров.

11. Внутренние силы тонкостенных пластин.
12. Вариационные методы решения задач по теории изгиба пластин.
13. Решение двумерных задач методом конечных элементов.
14. Уравнения изгиба кольца в своей плоскости.
15. Определение внутренних сил и моментов в замкнутом кольце.
16. Определение перемещений.
17. Расчёт замкнутых колец с помощью тригонометрических рядов.
18. Геометрия оболочек. Уравнения безмоментной теории.
19. Осесимметричная задача для безмоментной оболочки.
20. Уравнения моментной теории оболочек.
21. Классификация напряжённых соединений.
22. Краевой эффект. Расчёт пологой сферической оболочки.
23. Деформация цилиндрических оболочек.
24. Полубезмоментная теория цилиндрических оболочек.
25. Основы теории мягких оболочек.
26. Расчёты оболочек по предельным нагрузкам.
27. Критические нагрузки прямых упругих стержней.
28. Устойчивость прямоугольных пластин.
29. Энергетический метод исследования устойчивости пластин.
30. Поведение стержней и пластин после потери устойчивости.
31. Устойчивость круговых колец.
32. Основные уравнения устойчивости цилиндрической оболочки.
Устойчивость цилиндрической оболочки при осевом сжатии.
33. Устойчивость цилиндрической оболочки при внешнем давлении.
34. Устойчивость цилиндрической оболочки при кручении и поперечном изгибе.
35. Расчёт оболочек матричным методом начальных параметров.
36. Расчёт методом конечных разностей и методом конечных элементов тонкостенных пластин и оболочек.

ИНСТИТУТ ТЕХНИКИ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ФАКУЛЬТЕТ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ
ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ
КАФЕДРА РАКЕТНОЙ ТЕХНИКИ (ИМАШ РАН, базовая кафедра)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО
ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ
«РАСЧЁТ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

(Приложение 2 к рабочей программе)

Специальность: 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов

Специализация №21: Производство и технологическая отработка изделий ракетно-космической техники

Уровень высшего образования: специалитет

Квалификация (степень) выпускника: инженер

Форма обучения: очная, очно-заочная

Королёв
2023

1. Общие положения

Цель курса - овладение теоретическими основами моделирования и расчета на прочность и устойчивость тонкостенных конструкций, являющихся на сегодняшний день инновационными и, соответственно, испытывающие проблемы и пробелы в теоретической фундаментальной базе, в частности – необходимости использования Еврокода-3. Главная особенность курса – наличие конкретных примеров по расчету рассматриваемого типа конструкций.

Основными **задачами** дисциплины являются:

- овладение основами математической теории упругости, прикладной теории пластичности, ползучести;
- приобретение практического опыта по применению основных математических методов теоретического решения задач прикладной теории упругости, теории малых упругопластических деформаций и оценки прочности тонкостенных пластин и оболочек;
- знакомство с современными методами расчёта на прочность, исходный и остаточный ресурс, риски и безопасность.

2. Указания по проведению практических занятий

Практическое занятие 1

Вид практического занятия: *практическая работа в группах*

Тема и содержание практического занятия: уравнения механики деформируемого твёрдого тела.

Решение плоской задачи в полиномах.

Продолжительность занятия – 2/2 ч.

Практическое занятие 2

Вид практического занятия: *практическая работа в группах*

Тема и содержание практического занятия: элементы прикладной теории упругости.

Решение Ляме плоской задачи теории упругости для полого цилиндра.

Продолжительность занятия – 2/2 ч.

Практическое занятие 3

Вид практического занятия: *практическая работа в группах*

Тема и содержание практического занятия: методы решения задач строительной механики.

Решение задачи об изгибе прямоугольной пластины методом Бубнова-Галеркина

Продолжительность занятия – 4/4 ч.

Практическое занятие 4

Вид практического занятия: *практическая работа в группах*

Тема и содержание практического занятия: расчёт круговых колец.

Вращение диска. Напряжения в круглом диске.

Продолжительность занятия – 2/2 ч.

Практическое занятие 5

Вид практического занятия: *практическая работа в группах*

Тема и содержание практического занятия: прикладная теория оболочек.

Решение осесимметричной и неосесимметричной задачи цилиндрической и конической оболочки.

Продолжительность занятия – 4/4 ч.

Практическое занятие 6

Вид практического занятия: *практическая работа в группах*

Тема и содержание практического занятия: устойчивость стержней и пластин.

Устойчивость прямоугольной пластинки, свободно опертой по четырём сторонам и сжатой в одном направлении.

Продолжительность занятия – 2/2 ч.

Практическое занятие 7

Вид практического занятия: *практическая работа в группах*

Тема и содержание практического занятия: устойчивость цилиндрических оболочек.

Потеря устойчивости круговой цилиндрической оболочки под действием равномерного осевого сжатия.

Продолжительность занятия – 4/4 ч.

Практическое занятие 8

Вид практического занятия: *практическая работа в группах*

Тема и содержание практического занятия: основы расчёта оболочек численными методами.

Расчёт на прочность оболочечных конструкций методом конечных элементов и методом конечных разностей

Продолжительность занятия – 4/4 ч.

3. Указания по проведению лабораторного практикума

Не предусмотрен учебным планом.

4. Указания по проведению самостоятельной работы студентов

№ п/п	Наименование блока (раздела) дисциплины	Виды СРС
1	Основы расчёта многослойных тонких оболочек.	<p>Примерная тематика докладов в презентационной форме</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Упругое поведение деформируемых тел. 2. Обратная задача теории упругости. 3. Вариационные методы в теории упругости. 4. Метод конечных разностей. 5. Геометрия оболочек. 6. Расчёт пологой сферической оболочки.
2	Тонкие оболочечные конструкции с вырезами.	<p>Примерная тематика докладов в презентационной форме</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Энергетический метод исследования устойчивости пластин. 2. Устойчивость цилиндрической оболочки при осевом сжатии. 3. Расчёт оболочек матричным методом начальных параметров.
3	Конические и торообразные оболочки.	<p>Примерная тематика реферата</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Устойчивое и неустойчивое равновесие деформированного тела. 2. Осесимметричный изгиб круглых колец. 3. Матричный метод начальных параметров. 4. Метод конечных элементов. 5. Осесимметричная задача для безмоментной оболочки. 6. Деформация цилиндрических оболочек. 7. Поведение стержней и пластин после потери устойчивости. 8. Устойчивость цилиндрической оболочки при кручении и поперечном изгибе. 9. Численное решение задач устойчивости оболочек.

5. Указания по проведению контрольных работ для студентов факультета заочного обучения

5.1. Требования к структуре

Задание на контрольную работу включает исходные данные и определение неизвестных величин.

5.2. Требования к содержанию (основной части)

1. Должны быть приведены используемые формулы с наименованиями входящих параметров.

2. Решение задач должно сопровождаться краткими пояснениями. Рисунки и графики должны быть чёткими и ясными.

5.3. Требования к оформлению

Контрольная работа должна быть выполнена на формате А4 рукописным текстом. Рисунки и графики выполняются при помощи чертёжных инструментов или в графическом редакторе.

6. Указания по проведению курсовых работ

Не предусмотрено учебным планом

7. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная литература:

1. Новожилов В.В. Линейная теория тонких оболочек. - М.: ЁЁ Медиа, 2012. – 565 с.
2. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. - М.: ЛЕНАНД, 2017. – 496 с.
3. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: URSS, 2009. – 609 с.
4. Амосов А.А. Техническая теория тонких упругих оболочек. - М.: МГСУ, 2009. 304 с.

Дополнительная литература:

1. Аверьянов А.П. Введение в ракетно-космическую технику. Ракеты. Ч. 2 - Королёв М.О.: КИУЭС, 2011. – 210 с.
2. Погорелов В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 640 с.
3. Колкунов Н.В. Основы расчёта упругих оболочек. - М.: Высшая школа, 1972. – 296 с.
4. Шапошников, Н.Н. Строительная механика : учебник / Н.Н. Шапошников, Р.Х. Кристалинский, А.В. Дарков ; под общей редакцией Н.Н. Шапошникова. — 14-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 692 с. — ISBN 978-5-8114-0576-3. — Текст : электронный //

Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/105987> (дата обращения: 03.03.2020). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

8. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Интернет-ресурсы:

www.biblioclub.ru

www.rucont.ru

www.znaniium.com

www.e.lanbook.com

9. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Перечень программного обеспечения: *MSOffice, Excel, ANSYS, SolidWorks, MathCAD.*

Информационные справочные системы: Электронные ресурсы образовательной среды Университета