



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Дальневосточный федеральный университет»**  
(ДФУ)

**ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА**

«СОГЛАСОВАНО».

Руководитель ОП

Механика деформируемого твердого тела

(название образовательной программы)

 О.Н. Любимова

(подпись) (Ф.И.О.)

«14» января 2015 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой

Механики и математического моделирования

(название кафедры)

 А.А. Бочарова

(подпись) (Ф.И.О.)

«15» января 2015 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ (РПУД)**  
**МЕХАНИКА ОБОЛОЧЕК**

**Направление подготовки – 01.06.01, Математика и механика**  
**Профиль - Механика деформируемого твердого тела**

Образовательная программа «Механика деформируемого твердого тела»  
Форма подготовки очная

Инженерная школа  
Кафедра механики и математического моделирования  
курс 2 семестр 3  
лекции 18 час. / 0.5 з.е.  
практические занятия 18 час. / 0.5 з.е.  
лабораторные работы 0 час. / 0 з.е.  
всего часов аудиторной нагрузки 36 (час.) / 1 з.е.  
самостоятельная работа 72 (час.) / 2 з.е.  
контрольные работы (0)  
курсовая работа / курсовой проект - семестр  
зачет 3 семестр  
экзамен - семестр

Рабочая программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации), утвержденного приказом министерства образования и науки РФ от 30 июля 2014 № 866

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры механики и математического моделирования, протокол № 5 от «12» января 2015 г.

Заведующий кафедрой: А.А. Бочарова

Составитель: докт. техн. наук., профессор, профессор кафедры механики и математического моделирования С.В.Антоненко

**Оборотная сторона титульного листа программы**

**I. Рабочая программа дисциплины пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от «24» июня 2019 г. № 11

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

САФУ ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА  
КАФЕДРА МЕХАНИКИ И  
МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ

(подпись)

*Богарев ДА*

(И.О. Фамилия)

**II. Рабочая программа дисциплины пересмотрена на заседании кафедры:**

Протокол от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_

(подпись)

(И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Дисциплина «Механика оболочек» предназначена для аспирантов, обучающихся по образовательной программе «Механика деформируемого твердого тела» и входит в вариативную часть учебного плана.

При разработке рабочей программы учебной дисциплины использованы Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (уровень подготовки кадров высшей квалификации) по направлению подготовки 01.06.01 Математика и механика, учебный план подготовки аспирантов по профилю «Механика деформируемого твердого тела»

**Цель** - ознакомление аспирантов с теоретическими основами и практическими методами решения инженерных и научно-исследовательских задач расчёта и проектирования сложных инженерных сооружений.

### **Задачи:**

1. Развитие представлений о соотношениях между реальными объектами (инженерными сооружениями), их физическими и математическими моделями.
2. Изучение теории и методов расчёта статике и устойчивости оболочек.
3. Овладение навыками решения задач статике оболочек и анализа получаемых результатов.
4. Ознакомление с принципами проектирования инженерных сооружений, содержащих оболочки.

**Интерактивные формы обучения** составляют 12 часов и включают в себя 6 часов лекционных занятий (проблемная лекция), 6 часов практических занятий (обсуждение доклада).

**Компетенции выпускника, формируемые в результате изучения дисциплины**

Общепрофессиональные компетенции:

ОПК - 1 Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий;

Профессиональные компетенции:

ПК - 1 самостоятельно выполнять научные исследования в области механики деформируемого твердого тела, используя соответствующий физико-математический аппарат, вычислительные методы и компьютерные технологии, с целью установление законов деформирования, повреждения и разрушения материалов; выявлять новые связи между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения

**Требования к уровню усвоения содержания дисциплины.**

Аспиранты должны приобрести следующие знания и умения:

***знать:***

- методы реализации научно-исследовательской деятельности в области математики и механики, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач с использованием информационно-коммуникационных технологий

- научные основы и закономерности механических явлений, применяемые для изучения законов деформирования, повреждения и разрушения материалов, выявления новых связей между структурой материалов.

***уметь:***

- планировать и осуществлять научно-исследовательскую деятельность с применением современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий

- использовать базовый физико-математический аппарат, вычислительные методы и методы компьютерного моделирования для

выявления новых связей между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения.

***владеть:***

- навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации; выбора методов и средств решения задач исследования, навыками работы с вычислительной техникой

- современными методами и технологиями вычислительной математики и механики, компьютерными технологиями, применяемыми в области механики деформируемого твердого тела

## **I. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **МОДУЛЬ 1. Линейная теория тонких упругих оболочек. (14 час.)**

#### **Раздел I. Определение деформаций оболочки (6 час.)**

##### **Тема 1. Исходные положения (2 час.)**

Принципы построения физически состоятельной линейной теории тонких упругих оболочек. Допущения теории; координатные линии. Запись уравнений линейной теории. Уравнения движения (равновесия). Уравнения геометрии сплошной среды. Уравнение баланса работы внешних и внутренних поверхностных сил на перемещениях краевых поверхностей оболочки. Переход от уравнений движения к уравнениям равновесия.

##### **Тема 2. Перемещения и деформации тонких оболочек (2 час.)**

Дополнительные внутренние связи, налагаемые на материал оболочки гипотезами Кирхгофа-Тимошенко. Определение радиальных и тангенциальных перемещений оболочки, их связь с перемещениями точек срединной поверхности. Определение деформаций оболочки. Вспомогательные параметры деформации оболочки и её срединной поверхности.

**Тема 3. Уравнения неразрывности деформаций срединной поверхности оболочки (проблемная лекция) (2 час.)**

Условия, налагаемые сплошностью срединной поверхности и оболочки в целом. Уравнение деформированной срединной поверхности в векторной форме. Определение производных радиуса-вектора по криволинейным координатам. Нормали к деформированной срединной поверхности. Уравнения неразрывности деформаций срединной поверхности. Совпадение уравнений для случаев использования гипотез Кирхгофа и Кирхгофа-Тимошенко.

## **Раздел II. Определение внутренних усилий в оболочке (6 час.)**

### **Тема 1. Внутренние усилия и моменты (проблемная лекция) (2 час.)**

Пространственный элемент оболочки и напряжения, действующие по его граням. Определение внутренних усилий (тангенциальных и сдвигающих сил, изгибающих и крутящих моментов) в координатных плоскостях. Принятое правило знаков. Механическое взаимодействие оболочки с окружающей средой. Проблема краевых условий на торцевых поверхностях.

### **Тема 2. Уравнения равновесия оболочки (2 час.)**

Условия равновесия. Уравнения равновесия пространственного элемента оболочки. Неизвестные силовые факторы в уравнениях; статическая неопределимость задачи о равновесии оболочки.

### **Тема 3. Уравнения состояния оболочки (проблемная лекция) (2 час.)**

Связь внутренних силовых факторов с параметрами деформации срединной поверхности, параметрами изгиба и кручения оболочки и осреднёнными деформациями поперечного сдвига. Вывод уравнений состояния для различных степеней анизотропии материала. Формулы для определения напряжений в тонкой оболочке.

## **Раздел III. Общие принципы расчёта оболочек (2 час.)**

### **Тема 1. Уравнения статики тонких упругих оболочек (1 час.)**

Сводка уравнений механики оболочек. Количество, тип уравнений, количество неизвестных в системе уравнений статики оболочек. Три пути решения уравнений статики оболочек. Определение порядка

дифференциальных уравнений механики оболочек (на примере пластины).  
Статико-геометрическая аналогия.

## **Тема 2. Уравнения динамики тонких упругих оболочек. Дополнительные вопросы теории оболочек (1 час.)**

Основные задачи динамики оболочек. Особенности решения задачи определения собственных частот колебаний оболочки. Уравнения динамики оболочки. Порядок системы дифференциальных уравнений динамики оболочки.

Краевые условия на торцевых поверхностях оболочки. Особенности краевых условий для замкнутых оболочек (условия периодичности). Типовые примеры краевых условий. Условия сопряжения оболочки со смежными конструкциями. Начальные условия в задачах динамики оболочек. Потенциальная и кинетическая энергия оболочки. Погрешности линейной теории тонких упругих оболочек.

## **МОДУЛЬ 2. Устойчивость оболочек. (4 час.)**

### **Раздел I. Теория устойчивости оболочек (4 час.)**

#### **Тема 1. Современное состояние теории устойчивости оболочек (2 час.)**

Актуальность проблемы устойчивости конструкций. Проблемы теории устойчивости оболочек. Основные этапы развития теории устойчивости оболочек. Традиционные представления теории устойчивости оболочек. Влияние начальных несовершенств оболочки на критическую нагрузку. Развитие экспериментальных исследований устойчивости оболочек. Новое направление в согласовании теории с экспериментом. Высвобождение потенциальной энергии растянутых круговых элементов оболочки при потере устойчивости.

#### **Тема 2. Высвобождение потенциальной энергии деформированных элементов оболочки в процессе потери устойчивости. Уравнения теории устойчивости оболочек и их решение (2 час.)**

Механизм высвобождения и воздействия на оболочку высвобождаемой потенциальной энергии её деформированных элементов. Особенности поведения замкнутой (сферической – с положительной гауссовой кривизной) оболочки по сравнению с цилиндрической (с нулевой гауссовой кривизной). Определение внутренних сил упругости при статическом высвобождении потенциальной энергии. Определение внутренних сил упругости при динамическом высвобождении потенциальной энергии.

Принципы построения уравнений устойчивости. Составление системы уравнений. Уравнения прикладной теории устойчивости оболочек. Уравнения устойчивости пологих оболочек. Краевые условия в задачах устойчивости оболочек. Пределы применимости уравнений устойчивости оболочек. Методы решения уравнений устойчивости оболочек. Некоторые примеры.

Заключение. Общие соображения о развитии теории устойчивости оболочек.

## **II. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КУРСА**

### **Практические занятия (18 час.)**

#### **Занятие 1. Расчёт круговой цилиндрической оболочки, нагруженной погонными моментами и поперечными силами по торцу (2 час)**

Расчёт круговой цилиндрической оболочки неограниченной длины, нагруженной погонными моментами и поперечными силами по торцу. Из общего решения для радиального перемещения вдоль образующей определяются производные по координате, через которые получаются выражения для изгибающего момента и перерезывающей силы. После подстановки граничных условий находится уравнение упругой линии оболочки. Полученное решение используется в следующих задачах.



Результат решения (радиальные перемещения) изображается в виде графика зависимости перемещения от продольной координаты (расстояния точки оболочки от торца).

### **Занятие 2. Расчёт длинной цилиндрической оболочки, подкреплённой кольцами (2 час)**

Расчёт напряжений и деформаций в цилиндрической оболочке неограниченной длины, подкреплённой абсолютно жёсткими / деформируемыми кольцами, расположенными на значительном удалении друг от друга, при действии наружного равномерного давления. Усилие взаимодействия сжимает кольцо и вызывает изгиб оболочки. Для определения этого усилия используется решение, полученное в предыдущей задаче.

Результатом решения являются напряжения в оболочке и в кольце для случаев жёсткого и деформируемого колец.

### **Занятие 3. Расчёт длинной цилиндрической оболочки, подкреплённой кольцами (обсуждение доклада) (2 час)**

Условия задачи прежние. Но, в отличие от предыдущей задачи, расстояние между кольцами сравнительно невелико, в результате чего существует взаимное влияние между кольцами. Рассчитываются напряжения в кольцах и в сечениях оболочки по кольцу и между ними.

Результатом решения являются напряжения на наружной и на внутренней поверхностях оболочки в сечениях по кольцу и между ними, а также в кольце.

### **Занятие 4. Расчёт узла сопряжения цилиндрической оболочки с полусферическим днищем (2 час)**

При решении используется результат, полученный в первой задаче. Усилия взаимодействия определяются из условия совместности деформаций

цилиндрической и сферической частей оболочки. Результат решения – погонная поперечная сила по линии сопряжения частей оболочки.

#### **Занятие 5. Расчёт узла сопряжения цилиндрической оболочки с плоским дном (обсуждение доклада) (2 час)**

Задача подобна предыдущей, но отличается тем, что торцевая поверхность является плоской пластиной. Определяются нормальные и касательные напряжения по линии сопряжения частей оболочки. Результат показателен тем, что позволяет выявить преимущество оболочки по сравнению с пластиной в сосудах, нагруженных внешним (или внутренним) давлением.

#### **Занятие 6. Расчёт полусферического сосуда на гидростатическую нагрузку (2 час)**

Тонкостенный сосуд в виде полусферы, открытый сверху, частично заполнен жидкостью (водой). Результатом расчёта является построение эпюр главных напряжений в оболочке (по параллели и меридиану).

#### **Занятие 7. Устойчивость круглого кольца под действием равномерного давления (2 час) (обсуждение доклада)**

Расчёт цилиндрической оболочки, подкреплённой одинаковыми равноотстоящими круговыми кольцами (рёбрами жёсткости) и подвергающейся равномерному внешнему давлению. Определяется эйлерова нагрузка, соответствующая наложению волн на исходную круговую форму оболочки.

#### **Занятие 8. Устойчивость замкнутой цилиндрической оболочки, подкреплённой круговыми рёбрами жёсткости, под действием равномерного давления (2 час)**

В отличие от предыдущей задачи, сжимающие усилия действуют не только в радиальном, но и в осевом направлении. Это приводит к появлению

других форм потери устойчивости. Возможны искривление оси оболочки или изгиб оболочки между рёбрами.

В результате решения определяются критические напряжения для оболочки, соответствующие потере устойчивости.

### **Занятие 9. Расчёт сферического купола под действием сил собственного веса (2 час)**

Оболочка в виде сферического сегмента подвергается действию собственного веса, величина которого на единицу площади постоянная. Подлежат определению главные напряжения в оболочке.

## **III. КОНТРОЛЬ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ КУРСА**

### **Вопросы к экзамену**

1. Исходные положения линейной теории тонких упругих оболочек.
2. Состав и структура системы уравнений линейной теории оболочек.
3. Принципы и порядок определения перемещений и деформаций тонких оболочек.
4. Параметры деформации срединной поверхности оболочки.
5. Построение уравнений неразрывности деформаций срединной поверхности оболочки.
6. Определение внутренних усилий и моментов в тонкой оболочке.
7. Понятие о механическом взаимодействии оболочки с окружающей средой.
8. Принципы построения уравнений равновесия оболочки.
9. Принципы построения уравнений состояния оболочки.
10. Определение напряжений в оболочке.
11. Структура системы уравнений статики тонких упругих оболочек.
12. Пути решения задач статики оболочек.
13. Порядок дифференциальных уравнений механики оболочек.
14. Статико-геометрическая аналогия.
15. Понятие о динамике упругих оболочек.

16. Формулировка краевых и начальных условий в задачах расчёта оболочек.
17. Определение потенциальной и кинетической энергии оболочки.
18. Явление потери устойчивости в инженерных сооружениях.
19. Основные этапы развития теории устойчивости оболочек.
20. Современные представления о механизме потери устойчивости оболочки. Особенности поведения цилиндрической и сферической оболочки при потере устойчивости.
21. Принципы определения внутренних сил упругости при потере устойчивости оболочки.
22. Построение уравнений теории устойчивости оболочек.
23. Краевые условия в задачах устойчивости оболочек.
24. Перспективы развития теории оболочек.

#### **IV. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

##### **Основная литература (печатные и электронные издания)**

1. Пикуль В.В. Механика оболочек: учебное пособие [Электронный ресурс]. – Владивосток: Издательство ДВФУ, 2013. – <http://ini-fb.dvgu.ru/scripts/refget.php?ref=/000/293.iso>
2. Пикуль В.В. Механика оболочек. / В.В. Пикуль. - Владивосток: Дальнаука, 2009. – 536 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:304528&theme=FEFU>
3. Пикуль В.В. Современные проблемы науки в области прикладной механики: Учебник: В 2 ч. Ч. 2. Механика оболочек. / В.В. Пикуль. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005. – 524 с. <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:395334&theme=FEFU>

4. Любимова О.Н. Метод расчета термоупругих напряжений для оболочек из стеклометаллокомпозита / О. Н. Любимова ; Дальневосточный федеральный университет. – Владивосток: Изд. дом Дальневосточного федерального университета, 2012. – 77 с.  
<http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:679367&theme=FEFU>

**Дополнительная литература**  
(печатные и электронные издания)

1. Карпов В.В. Программный комплекс исследования устойчивости оболочек. / В.В. Карпов, Д.А. Баранова, Р.Т. Беркалиев. - СПб.: СПбГАСУ, 2009. - 104 с. <http://window.edu.ru/resource/221/67221>

2. Иванов И.С. Расчет и проектирование технологической оснастки в машиностроении: Учебное пособие / И.С. Иванов. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 198 с. <http://znanium.com/bookread.php?book=405031>

3. Васильков Г.В. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений. Учебник / Г.В. Васильков, З.В. Буйко. – СПб: Лань, 2013. – 256 с. <http://e.lanbook.com/view/book/5110/>

4. Рахматулин, Х. А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках [Электронный ресурс] / Х. А.Рахматулин , Ю. А. Демьянов. - 2-е изд., доп. - М.: Университетская книга; Логос, 2009. - 512 с. <http://znanium.com/bookread.php?book=469468>

5. Богомаз, И. В. Механика [Электронный ресурс] : учеб. пособие / И. В. Богомаз. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. - 346 с. <http://znanium.com/bookread.php?book=442969>

6. Варданян Г.С. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности: Уч. / В.И.Андреев и др.; Под ред. Г.С.Варданяна, Н.М.Атарова. - 2-е изд., испр. и доп. - М.: ИНФРА-М, 2014. - 638 с. <http://znanium.com/bookread.php?book=448729>