

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук  
(ПФИЦ УрО РАН)**

Принято на заседании  
Объединенного ученого совета  
ПФИЦ УрО РАН

Протокол № 6  
«2» сентября 2022 г.

**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. директора ПФИЦ УрО РАН  
чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.

  
О. А. Нелехов  
«12» сентября 2022 г.



**ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ ПРОГРАММА  
ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ**

**«Современные методы вычислительной механики»**

ПЕРМЬ, 2022

# 1 Общая характеристика программы

## 1.1 Цель реализации программы

Учебный курс разработан в рамках реализации программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук». Его целью является ознакомление слушателей с численными методами решения различных физических задач, обучение современным алгоритмам реализации метода конечных элементов, применение их для оценки напряжённо-деформированного состояния и определения основных динамических характеристик деталей и конструкций.

Основу учебной программы составляют разделы механики сплошной среды, аналитической динамики и теории колебаний, механики упругого анизотропного тела, вычислительной механики и метод конечных элементов.

## 1.2 Планируемые результаты обучения

В результате освоения программы обучающийся качественно изменяет следующие компетенции:

### Трудовая функция

Самостоятельное решение исследовательских задач в рамках реализации научного (научно-технического, инновационного) проекта, связанного с оценкой и оптимизацией прочностных и динамических характеристик конструкций из конструкционных материалов и сплавов.

### Трудовое действие

Проведение исследований, направленных на решение отдельных задач, в том числе:

- формализация, постановка и поиск пути решения исследовательских задач;
- определение информационных ресурсов, научной, опытно-экспериментальной и приборной базы, необходимых для решения исследовательских задач;
- интерпретация научных результатов, полученных в ходе численного решения исследовательских задач.

В результате изучения программы обучающийся должен демонстрировать следующие результаты:

### **Знать:**

- о численных методах решения связанных задач механики деформируемого твёрдого тела с помощью программных средств;

- основные зависимости метода конечных элементов;
- типы конечных элементов и их аппроксимирующих функций;
- основы численной реализации метода конечных элементов.

**Уметь:**

- создавать графические изображения деталей, узлов конечных элементов, полей рассчитанных величин;

- применять соответствующую процессу математическую модель, проверять её адекватность;

- применять специализированное программное обеспечение для решения связанных задач механики деформируемого твёрдого тела;

- применять программные средства компьютерной графики и визуализации результатов научно-исследовательской деятельности;

- использовать нормативные правовые документы в своей деятельности;

- анализировать результаты расчётов.

**Владеть:**

- алгоритмами реализации метода конечных элементов;

- научным обоснованием выбора и использования типов конечных элементов;

- алгоритмами численного интегрирования и решения систем линейных уравнений;

- навыками самостоятельного анализа и решения теоретических и практических связанных задач методом конечных элементов;

- специализированным программным обеспечением для решения статических и модальных задач аэро-, гидро- и пьезоупругости.

### **1.3 Категория слушателей**

К освоению дополнительной профессиональной программы повышения квалификации допускаются лица, имеющие высшее образование — бакалавриат, специалитет, магистратура, а также высшее образование — подготовка кадров высшей квалификации (аспирантура, и докторантура). Приоритет при реализации программы отдаётся специалистам, участвующим в создании и развитии научного центра мирового уровня «Сверхзвук».

#### **1.4 Трудоемкость обучения**

Срок освоения программы повышения квалификации составляет 45 часов.

#### **1.5 Форма обучения**

Форма обучения — очная.

## 2 Содержание программы

### 2.1 Учебный план

Таблица 2.1 — Учебный план по модулям учебной дисциплины

Номер модуля	Номер раздела	Общая трудоёмк., ч.	Аудиторные занятия, ч			Итоговая аттестация	СР, в т.ч. КСР, ч	Форма контроля
			Всего	Лк	ЛР			
1	1	8	3	3	–	–	5	текущий контроль
	2	3	2	2	–	–	1	текущий контроль
	<b>Всего по модулю</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>–</b>	<b>–</b>	<b>6</b>	<b>–</b>
2	3	22	14	8	6	–	8	текущий контроль, рубежный контроль
	4	8	4	2	2	–	4	рубежный контроль
	<b>Всего по модулю</b>	<b>30</b>	<b>18</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>–</b>	<b>12</b>	<b>–</b>
<b>Итоговая аттестация</b>		<b>4</b>	<b>–</b>	<b>–</b>	<b>–</b>	<b>4</b>	<b>–</b>	<b>зачёт</b>
<b>Итого</b>		<b>45</b>	<b>23</b>	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>18</b>	<b>–</b>

### 2.2 Учебно-тематический план

Таблица 2.2 — Учебно-тематический план по модулям учебной дисциплины

Номер модуля	Номер раздела	Номер темы	Общая трудоёмк., ч.	Аудиторные занятия, ч			Итоговая аттестация	СР, в т.ч. КСР, ч	Форма контроля
				Всего	Лк	ЛР			
1	1	1	0.5	0.5	0.5	–	–	–	–
		2	0.5	0.5	0.5	–	–	–	текущий контроль
		3	3	1	1	–	–	2	текущий контроль
		4	4	1	1	–	–	3	текущий контроль
	2	5	1	1	1	–	–	–	текущий контроль
		6	2	1	1	–	–	1	текущий контроль
<b>Всего по модулю</b>		<b>11</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>–</b>	<b>–</b>	<b>6</b>	<b>–</b>	
2	3	7	8	4	2	2	–	4	рубежный контроль
		8	12	8	4	4	–	4	рубежный контроль
		9	2	2	2	–	–	–	текущий контроль

	4	10	8	4	2	2	–	4	рубежный контроль
	Всего по модулю		30	18	10	8	–	12	–
Итоговая аттестация			4	–	–	–	4	–	зачёт
Итого			45	23	15	8	4	18	–

### 2.3 Календарный учебный график

Таблица 2.3 — Календарный учебный график

День занятия	Форма занятия	Кол-во часов	Тема занятия	Форма контроля
1	очно	3	Темы 1, 2, 3 и 4	Текущий контроль
2	очно	2	Темы 5, 6	Текущий контроль
3	очно	4	Тема 7	Рубежный контроль
4	очно	4	Тема 8	Рубежный контроль
5	очно	4	Тема 8	Рубежный контроль
6	очно	2	Тема 9	Текущий контроль
7	очно	4	Тема 10	Рубежный контроль
8	очно	4	Итоговая аттестация	Зачёт

### 2.4 Рабочая учебная программа дисциплины «Современные методы вычислительной механики»

**Модуль 1.** Теоретические аспекты метода конечных элементов в задачах статики и динамики конструкций.

**Раздел 1.** Основные уравнения и понятия.

Лк — 3 ч, СР — 5.

**Тема 1.** Введение

Организация учебного процесса. Предмет и задачи дисциплины. Основные понятия, термины и определения. История развития метода конечных элементов. Обзор возможностей и границ применения.

**Тема 2.** Вариационная формулировка метода конечных элементов в линейных задачах статики и динамики конструкций.

Принцип возможных перемещений. Кинематические и статические граничные условия, массовые силы.

**Тема 3.** Различные виды конечных элементов.

Семейство треугольных элементов. Сирендиповы и Лагранжевы четырёхугольные элементы. Трёхмерные элементы. Эрмитовы элементы. Конечные элементы для пластин и оболочек.

**Тема 4.** Нелинейный анализ и линеаризованные задачи в механике твёрдого тела.

Геометрически нелинейные задачи. Большие перемещения и устойчивость конструкций. Предварительное напряжённое деформированное состояние.

**Раздел 2.** Изогеометрический анализ: интеграция CAD и МКЭ.

Лк — 2 ч, СР — 1 ч.

**Тема 5.** Точное описание геометрии.

В-сплайны и NURBS. Поверхности и объёмные объекты.

**Тема 6.** Изогеометрический анализ в задачах статики.

Примеры. Сходимость решения. Параметрический анализ.

**Модуль 2.** Применение метода конечных элементов для решения некоторых типовых задач.

**Раздел 3.** Связанные задачи механики деформированного твёрдого тела.

Лк — 8 ч, ЛР — 6 ч, СР — 8 ч.

**Тема 7.** Электроупругость.

Математическая постановка задачи. Собственные колебания электроупругих тел, соединённых с внешними электрическими цепями. Пассивное демпфирование резонансных колебаний с помощью пьезоэлементов, соединённых с внешней электрической цепью. Подбор оптимальных параметров *RL*-цепи. Решение гармонических задач электроупругости в пакете ANSYS Multiphysics.

**Тема 8.** Гидроупругость.

Связанное движение упругой конструкции в акустической среде. Слабая формулировка метода взвешенных невязок для волнового уравнения. Решение задачи о собственных колебаниях конструкции, взаимодействующей с жидкостью, в пакете ANSYS Multiphysics. Гидроупругая устойчивость пластины на слое жидкости. Гидроупругая устойчивость цилиндрической оболочки с разными граничными условиями.

**Тема 9.** Аэроупругая устойчивость тонких пластин и оболочек.

Поршневая теория. Панельный флаттер прямоугольных пластин. Влияние кривизны пологой оболочки на границу устойчивости. Флаттер подкреплённых пологих оболочек. Флаттер цилиндрической оболочки. Флаттер конической оболочки с внутренним течением газа.

**Раздел 4.** Моделирование и расчёт тонкостенных конструкций из композиционных материалов.

Лк — 2 ч, ЛР — 2 ч, СР — 4 ч.

**Тема 10.** Моделирование и расчёт тонкостенных конструкций из композиционных материалов.

Элементы механики упругого анизотропного тела. Возможности САПР ANSYS для моделирования конструкций из композиционных материалов. Интерфейс ANSYS Composite PrepPost (ACP). Механические свойства слоя и пакета слоёв. Система координат конечных элементов. Обработка результатов моделирования.

### 2.5 Перечень тем практических занятий

Не предусмотрены.

### 2.6 Перечень тем лабораторных работ

Таблица 2.4 — Темы лабораторных работ

№	Номер темы дисциплины	Наименование темы лабораторной работы
1	7	Вынужденные гармонические колебания полой оболочки с пьезоэлементом, соединённым с внешней $RL$ -цепью
2	8	Собственные колебания цилиндрической оболочки, частично заполненной жидкостью
3	8	Напряжённо-деформированное состояние конструкции, взаимодействующей со стационарным потоком жидкости
4	10	Расчёт напряжённо-деформированного состояния конструкции из слоистого композитного материала



### **3 Организационно-педагогические условия реализации программы**

#### **3.1 Образовательные технологии, используемые для формирования компетенций**

В процессе изучения тем по данной образовательной программе используются современные образовательные технологии (критическое мышление, проблемное обучение и др.) и информационно-коммуникационные технологии как в проведении лекционных занятий, так и в самостоятельной работе слушателей. Применение технологий и их сочетание определяется преподавателями, ведущими обучение по темам программы, самостоятельно.

При проведении лабораторных работ используются активные и интерактивные методы, предполагающие применение информационных технологий, а также решение профессионально-ориентированных задач.

#### **3.2 Учебно-методическое обеспечение программы**

В учебном процессе используются:

##### **3.2.1 Учебные и научные издания**

- 1) Бессонов Л. В. Методы Рунта, Галёркина и конечных элементов в математическом и компьютерном моделировании: учебное пособие. — Саратов: Саратовский источник, 2021. — 37 с.
- 2) Солдаткин А. В. Введение в метод конечных элементов: учебное пособие / А. В. Солдаткин, Е. С. Баранова. — Санкт-Петербург: БГТУ, 2020. — 122 с.
- 3) Чепурненко А. С. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела и строительной механике: учебное пособие / А. С. Чепурненко, Б. М. Языев. — Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2021. — 92 с.
- 4) Агапов В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций. Учебное пособие / М.:, Издательство АСВ, 2000, — 152 с.
- 5) Бате К.-Ю. Методы конечных элементов / пер. с англ. В. П. Шидловского, под ред. Л. И. Турчака. — М.: Физматлит, 2010. — 1024 с.
- 6) Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / пер. с англ. Б. И. Квасова, под ред. Н. С. Бахвалова. — М.: Мир, 1986. — 318 с.
- 7) Морозов Е. М., Муйземнек А. Ю., Шадский А. С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. — М.: ЛЕНАНД, 2008. — 456 с.

- 8) Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. — М.: Едитория УРСС, 2000. — 254 с.
- 9) Сегерлинд, Л. Дж. Применение метода конечных элементов / пер. с англ. А. А. Шестакова, под ред. Б. Е. Победри. — М.: Мир, 1979. — 392 с.

### 3.2.2 Периодические издания:

- 1) журнал «Известия РАН. Механика твердого тела» (<http://mtt.ipmnet.ru/ru/>);
- 2) журнал «Вычислительная механика сплошных сред» (<http://www2.icmm.ru/journal/cont.htm>);
- 3) журнал «Вестник ПНИПУ. Механика» (<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics>).

### 3.2.3 Электронные ресурсы:

- 1) электронная библиотека диссертаций РГБ (<http://diss.rsl.ru/>);
- 2) научная электронная библиотека РИНЦ (<http://elibrary.ru/>);
- 3) научная электронная библиотека ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com>);
- 4) научная электронная библиотека SpringerLink (<https://link.springer.com>);
- 5) научная электронная библиотека Elsevier (<https://www.elsevier.com>);
- 6) полнотекстовая мультидисциплинарная база данных диссертаций ProQuest Dissertations & Theses Global (<http://proquest.com/pqdtglobal/dissertations>);
- 7) университетская информационная система Россия (<https://uisrussia.msu.ru>);
- 8) университетские библиотеки г. Перми:
  - 8.1. <http://biblioclub.ru>
  - 8.2. <http://pspu.ru/university/biblioteka/jelektronnye-resursy-biblioteki>
  - 8.3. <https://perm.hse.ru/library>
  - 8.4. <http://biblioteki.perm.ru>
- 9) наукометрическая и реферативная база данных Scopus (<https://www.scopus.com>);
- 10) электронная база данных Web of Science (<http://apps.webofknowledge.com>);
- 11) национальная электронная библиотека (<https://нэб.рф>).

## 3.3 Материально-технические условия

Таблица 3.1 — Материально-технические условия

Наименование специализированных аудиторий, кабинетов, лабораторий	Вид занятий	Наименование оборудования, программного обеспечения
Лекционная мультимедийная аудитория	лекция	компьютер, мультимедийный проектор, экран, меловая (или маркерная) доска, набор фломастеров-маркеров

### **3.4 Кадровое обеспечение**

Кадровое обеспечение ДПП повышения квалификации реализуется сотрудниками НЦМУ «Сверхзвук» ПФИЦ УрО РАН.

Состав итоговой аттестационной комиссии (ИАК) по программе формируется из числа педагогических и научных работников Центра, ведущих специалистов и практиков предприятия, а также лиц, приглашаемых из сторонних организаций: специалистов предприятий, учреждений и организаций по профилю осваиваемой слушателями программы.

## 4 Оценка качества освоения программы

### 4.1 Формы аттестации

Контроль успеваемости обучающихся включает в себя целенаправленный систематический мониторинг освоения слушателями программы повышения квалификации в целях:

- получения необходимой информации о выполнении слушателями дополнительной профессиональной программы повышения квалификации,
- оценки уровня знаний, умений и приобретенных (усовершенствованных) слушателями компетенций;
- стимулирования самостоятельной работы слушателей.

**Текущий контроль** — устный опрос и проведение двух контрольных работ.

**Рубежный контроль** — защита отчета по лабораторным работам.

Примерные вопросы **итоговой аттестации** приводятся в разделе «Оценочные материалы».

Итоговая аттестация для слушателей проводится итоговой аттестационной комиссией (ИАК) в соответствии с «Порядком проведения текущей, промежуточной и итоговой аттестации при освоении ДПП».

Освоение дополнительной профессиональной программы повышения квалификации завершается итоговым зачетом в форме собеседования и устных ответов на вопросы, согласно перечню контрольных вопросов по программе «Современные методы вычислительной механики». Оценка качества освоения программы осуществляется ИАК на основе двухбалльной системы оценок (зачтено/незачтено) по основным темам программы.

Лицам, успешно освоившим программу профессиональной переподготовки, получившим на итоговой аттестации оценку «зачтено», выдается документ о повышении квалификации — удостоверение о повышении квалификации. Лицам, не прошедшим итоговую аттестацию или получившим на итоговой аттестации оценку «незачтено», а также лицам, освоившим часть программы профессиональной переподготовки и (или) отчисленным в ходе освоения дополнительной профессиональной программы, выдается справка об обучении.

## 4.2 Оценочные материалы

### 4.2.1 Типовые контрольные вопросы для оценивания знаний на итоговом зачете по программе

- 1) Принцип возможных перемещений. Кинематические и статические граничные условия, массовые силы.
- 2) Семейство треугольных элементов. Сирендиповы и Лагранжевы четырёхугольные элементы.
- 3) Трёхмерные элементы. Эрмитовы элементы. Конечные элементы для балок, пластин и оболочек.
- 4) Геометрически нелинейные задачи. Большие перемещения и устойчивость конструкций. Предварительное напряжённое деформированное состояние.
- 5) В-сплайны и NURBS. Поверхности и объёмные объекты.
- 6) Изогеометрический анализ в задачах статики.
- 7) Электроупругость. Математическая постановка задачи. Собственные колебания электроупругих тел, соединённых с внешними электрическими цепями.
- 8) Пассивное демпфирование резонансных колебаний с помощью пьезоэлементов, соединённых с внешней электрической цепью. Подбор оптимальных параметров  $RL$ -цепи.
- 9) Связанное движение упругой конструкции в акустической среде. Слабая формулировка метода взвешенных невязок для волнового уравнения.
- 10) Гидроупругая устойчивость пластины на слое жидкости. Гидроупругая устойчивость цилиндрической оболочки с разными граничными условиями.
- 11) Поршневая теория. Панельный флаттер прямоугольных пластин. Влияние кривизны пологой оболочки на границу устойчивости.
- 12) Флаттер подкреплённых пологих оболочек. Флаттер цилиндрической оболочки. Флаттер конической оболочки с внутренним течением газа.
- 13) Элементы механики упругого анизотропного тела. Механические свойства слоя и пакета слоёв. Система координат конечных элементов.

### 4.2.2 Типовые контрольные вопросы для оценивания знаний на итоговом зачёте по программе

- 1) На языке APDL в ANSYS Multiphysics построить параметризованную геометрическую модель прямоугольной пластины, взаимодействующей со слоем жидкости. Осуществить разбиение полученной геометрии на конечные элементы.

Вычислить пять низших собственных частот колебаний при условии, что пластина жёстко закреплена по периметру.

2) Определить напряжённно-деформированное состояние конструкции из композиционного материала (геометрия и условия нагружения выдаются преподавателем).

3) На языке APDL в ANSYS Multiphysics построить параметризованную геометрическую модель консольно-закреплённой прямоугольной пластины с пьезоэлементом, расположенным на её внешней поверхности. Осуществить разбиение полученной геометрии на конечные элементы. Определить напряжённно-деформированное состояние пластины при условии, что на пьезоэлемент подано напряжение 100 В.

Методические материалы и фонды оценочных средств представлены в приложении к дополнительной профессиональной программе повышения квалификации «Современные методы вычислительной механики».

## 5 Составители программы

Составители программы повышения квалификации:

ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук



подпись

С. А. Бочкарёв

ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук



подпись

С. В. Лекомцев

науч. сотр.



подпись

Д. А. Ошмарин

науч. сотр.



подпись

Г. С. Сероваев

Руководитель лаборатории «Прочность и интеллектуальные конструкции»  
НЦМУ «Сверхзвук» академик РАН, д.т.н.



подпись

В. П. Матвееenko

## ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ

№ редакции документа	Описание изменений	Автор	Дата вступления в действие