

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования\_  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»**

Институт информационных технологий, математики и механики

---

УТВЕРЖДЕНО  
решением Ученого совета ННГУ  
протокол № 12 от 26.12.2023 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Численное моделирование поведения пороупругих тел и сред

---

Уровень высшего образования  
Бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность  
15.03.03 - Прикладная механика

---

Направленность образовательной программы  
Инженерное приложение суперкомпьютерного моделирования

---

Форма обучения  
очная

---

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.В.ДВ.05.02 Численное моделирование поведения пороупругих тел и сред относится к части, формируемой участниками образовательных отношений образовательной программы.

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ПК-2: Умеет извлекать актуальную научно-техническую информацию из электронных библиотек, научных сайтов и т.д., анализировать полученную информацию для применения в научной работе, а также публично представлять полученные результаты с учетом уровня аудитории	ПК-2.1: Умеет извлекать актуальную научно-техническую информацию из электронных библиотек, научных сайтов и т.д. ПК-2.2: Знает методы анализа полученной информации, умеет применять ее в научной работе ПК-2.3: Имеет практический опыт публичного представления полученных результатов в соответствии с уровнем аудитории	ПК-2.1: Уметь извлекать актуальную научно-техническую информацию из электронных библиотек, научных сайтов и т.д.  ПК-2.2: Знать методы анализа полученной информации, умеет применять ее в научной работе  ПК-2.3: Владеет навыками и практическим опытом публичного представления полученных результатов в соответствии с уровнем аудитории	Практическое задание Расчетно-графическая работа	Зачёт: Контрольные вопросы

## 3. Структура и содержание дисциплины

### 3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	2
Часов по учебному плану	72
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	26
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	26

- КСР	1
самостоятельная работа	19
Промежуточная аттестация	0 зачёт

### 3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/ лабора- торные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
1. Основы теории фильтрации двухфазных сред. Понятие пористости, насыщенности. Закон Дарси. Математическая модель пороупругой среды. Подходы Филлунгера и Терцаги. Модель Био-Френкеля.	5	2	2	4	1
2. Кинематические переменные пороупругой среды. Силовые переменные пористой упругой среды. Определяющие соотношения пористого упругого материала.	6	2	2	4	2
3. Инерционные и диссипативные характеристики пористой упругой среды. Дренажное и недренажное деформирование пористого упругого материала. Соотношения между модулями среды в двух состояниях.	6	2	2	4	2
4. Система разрешающих уравнений и основные неизвестные. Уравнения движения пороупругой среды в «u-p» переменных во времени и в пространстве изображений по Лапласу. Уравнения движения среды в «u-w» переменных.	6	2	2	4	2
5. Продольные и поперечные волны в насыщенных пороупругих средах. Медленная продольная волна Био.	6	2	2	4	2
6. Модельная задача о действии нагрузки в виде функции Хевисайда по времени на одномерный пороупругий стержень. Моделирование эффекта медленной продольной волны.	6	2	2	4	2
7. Метод конечных элементов в задачах пороупругости. Ослабленная формулировка задачи пороупругости в «u-p» и «u-w» переменных. Конечно-элементная дискретизация уравнений в «u-p» и «u-w» переменных. Дискретизация по времени.	6	2	2	4	2
8. Метод граничных элементов в задачах пороупругости. Формулы Грина. Метод потенциалов. Граничные интегральные уравнения. Матрицы фундаментальных и сингулярных решений трехмерной динамической теории пороупругости.	8	2	4	6	2
9. Разработка алгоритмов и программных модулей для численного решения задач динамики пороупругих тел.	8	4	2	6	2
10. Решение модельных задач трехмерной динамической теории пороупругости с помощью модуля «Прочность» пакета программ «ЛОГОС»	14	6	6	12	2
Аттестация	0				

КСР	1			1	
Итого	72	26	26	53	19

### Содержание разделов и тем дисциплины

1. Основы теории фильтрации двухфазных сред. Понятие пористости, насыщенности. Закон Дарси. Математическая модель пороупругой среды. Подходы Филлунгера и Терцаги. Модель Био-Френкеля.
2. Кинематические переменные пороупругой среды. Силовые переменные пористой упругой среды. Определяющие соотношения пористого упругого материала.
3. Инерционные и диссипативные характеристики пористой упругой среды. Дренированное и недренированное деформирование пористого упругого материала. Соотношения между модулями среды в двух состояниях.
4. Система разрешающих уравнений и основные неизвестные. Уравнения движения пороупругой среды в «u-r» переменных во времени и в пространстве изображений по Лапласу. Уравнения движения среды в «u-w» переменных.
5. Продольные и поперечные волны в насыщенных пороупругих средах. Медленная продольная волна Био.
6. Модельная задача о действии нагрузки в виде функции Хевисайда по времени на одномерный пороупругий стержень. Моделирование эффекта медленной продольной волны.
7. Метод конечных элементов в задачах пороупругости. Ослабленная формулировка задачи пороупругости в «u-r» и «u-w» переменных. Конечно-элементная дискретизация уравнений в «u-r» и «u-w» переменных. Дискретизация по времени.
8. Метод граничных элементов в задачах пороупругости. Формулы Грина. Метод потенциалов. Граничные интегральные уравнения. Матрицы фундаментальных и сингулярных решений трехмерной динамической теории пороупругости.
9. Разработка алгоритмов и программных модулей для численного решения задач динамики пороупругих тел.
10. Решение модельных задач трехмерной динамической теории пороупругости с помощью модуля «Прочность» пакета программ «ЛОГОС»

### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

Самостоятельная работа обучающихся выполняется по заданию преподавателя, без его непосредственного участия и направлена на самостоятельное изучение отдельных аспектов тем дисциплины.

Цель самостоятельной работы – подготовка современного компетентного специалиста и формирования способностей и навыков к непрерывному самообразованию и профессиональному совершенствованию.

Самостоятельная работа может включать следующие виды работ:

- изучение понятийного аппарата дисциплины;
- проработка тем дисциплины, поиск информации в электронных библиотечных системах;
- подготовка к практическим занятиям;
- работа с основной и дополнительной литературой, представленной в рабочей программе;
- подготовка к промежуточной аттестации;

- изучение материала, вынесенного на самостоятельную проработку;
- работа в электронных библиотечных системах, справочных, справочно-поисковых и иных системах.

## **5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)**

### **5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:**

#### **5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Практическое задание) для оценки сформированности компетенции ПК-2:**

1. Моделирование контактной задачи на примере плоского недеформируемого штампа в изотропную линейно упругую полуплоскость с помощью ЛОГОС.
2. Моделирование контактной задачи на примере цилиндрического недеформируемого штампа в изотропную линейно упругую полуплоскость с помощью ЛОГОС.
3. Моделирование штамповки профиля эластичным инструментом в ЛОГОС.
4. Исследование соударения полого шара с недеформируемой преградой в ЛОГОС.
5. Исследование падения контейнера в ЛОГОС.
6. Проведение расчетов быстротекущих процессов в модуле ЛОГОС на примере падения блока на длинную балку.
7. Модальный анализ консольной балки.
8. Анализ предварительно напряженной консольной балки.
9. Модальный анализ жестко закрепленной цилиндрической оболочки.
10. Анализ предварительно напряженной жестко закрепленной цилиндрической оболочки.
11. Оптимальное проектирование стержневых систем с учетом ограничений по прочности и кратным частотам собственных колебаний.

#### **Критерии оценивания (оценочное средство - Практическое задание)**

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки, без ошибок
не зачтено	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки.

#### **5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Расчетно-графическая работа) для оценки сформированности компетенции ПК-2:**

1. Гармонический анализ консольной балки. Полный метод.
2. Определение полей перемещений, напряжений на первой резонансной частоте.
3. Решите данную задачу, если постоянное демпфирование равно 5%, 10%.
4. Сравните результаты.
5. Гармонический анализ пластины. Разложение по модам.
6. Определение полей перемещений, напряжений на первой резонансной частоте.
7. Решите данную задачу, если постоянное демпфирование равно 5%, 10%.
8. Сравните результаты.
9. Работа гасителя поперечных колебаний шарнирно опертой балки.
10. Определить отклик системы, состоящей из трех масс и четырех пружин,

11. на гармоническую силу, приложенную к одной из масс. Решите данную задачу,
12. если постоянное демпфирование равно 0%, 4%. Сравнить результаты, полученные
13. в ЛОГОС и МАТНЕМАТИКА.
14. Определить отклик системы с одной степенью свободы на импульсно ступенчато приложенную нагрузку с учетом и без демпфирования. Сравнить результаты, полученные в ЛОГОС и МАТНЕМАТИКА.
15. Определить отклик системы с одной степенью свободы на импульсно треугольно приложенную нагрузку с учетом и без демпфирования. Сравнить результаты, полученные в ЛОГОС и МАТНЕМАТИКА.
16. Определить отклик системы с одной степенью свободы на двухступенчатую импульсно приложенную нагрузку с учетом и без демпфирования. Сравнить результаты, полученные в ЛОГОС и МАТНЕМАТИКА.
17. Определить отклик системы с одной степенью свободы на полусинусоидально импульсно приложенную нагрузку с учетом и без демпфирования. Сравнить результаты, полученные в ЛОГОС и МАТНЕМАТИКА.
18. Провести анализ переходных процессов (транзиентный анализ) консольной балки на импульсно ступенчато приложенную нагрузку с учетом и без демпфирования.
19. Получить ударный спектр для максимального отклика от действия полусинусоидального импульса для линейной системы с одной степенью свободы как функции отношения длительности импульса к периоду собственных колебаний. Рассмотреть влияние демпфирования на отклики и ударные спектры.
20. Определение максимального отклика системы с  $n$  степенями свободы от действия полусинусоидального импульса спектральным методом.
21. Получить ударный спектр для максимального отклика от действия прямоугольного импульса для линейной системы с одной степенью свободы как функции отношения длительности импульса к периоду собственных колебаний. Рассмотреть влияние демпфирования на отклики и ударные спектры.
22. Определение максимального отклика системы с  $n$  степенями свободы от действия прямоугольного импульса спектральным методом.
23. Провести спектральный анализ для плоской рамы в ЛОГОС. Выполнить сравнительный анализ максимальных значений выбранных компонент вектора узловых перемещений, полученных с использованием метода квадратного корня SRSS из суммы квадратов  $\Delta_{ji}$  вручную и с помощью ЛОГОС.
24. Провести спектральный анализ для пространственной фермы в ЛОГОС. Выполнить сравнительный анализ максимальных значений выбранных компонент вектора узловых перемещений, полученных с использованием метода квадратного корня SRSS из суммы квадратов  $\Delta_{ji}$  вручную и с помощью ЛОГОС.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Расчетно-графическая работа)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Ответ полный и правильный на основании изученной теории; теоретический материал и решение поставленных задач изложены в необходимой логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный. Могут быть допущены две-три не существенные ошибки, исправленные по требованию преподавателя.
не зачтено	Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих

Оценка	Критерии оценивания
	вопросах преподавателя.

## 5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

### Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатор достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельным и несущественными недочетами, выполнены все задания в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторыми недочетами	Продemonстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продemonстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

### Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

### 5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

#### 5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ПК-2

1. В каких задачах требуется проводить динамический анализ.
2. Виды динамических воздействий.
3. Общее уравнение движения. Его формы для различных типов динамических анализов.
4. Способы решения общего уравнения движения.
5. Метод суперпозиции собственных форм.
6. Метод прямого интегрирования (метод Ньюмарка, метод Гильбера-Хьюза-Тейлора).
7. Модальный анализ. Последовательность действий при проведении модального анализа в ЛОГОС.
8. Кратные частоты собственных колебаний. Производные по направлению для кратных частот.
9. Модальный анализ предварительно напряженных конструкций.
10. Гармонический анализ. Полный метод. Усеченный метод. Метод суперпозиции мод.
11. Нахождение решения задачи гармонического анализа в виде набора амплитуд и фазовых углов.
12. Нахождение решения задачи гармонического анализа в виде реальной и мнимой частей решения.
13. Матрица коэффициентов динамического усиления внешней нагрузки.
14. Три типа демпфирования. Матрица демпфирования.
15. Последовательность действий при проведении гармонического анализа в ЛОГОС.
16. Анализ переходных процессов. Три метода решения.



17. Расчет систем с одной степенью свободы при действии произвольной нагрузки. Интеграл Дюамеля.
18. Динамический анализ переходных процессов полным методом.
19. Динамический анализ переходных процессов редуцированным методом.
20. Динамический анализ переходных процессов методом суперпозиции мод.
21. Последовательность действий при проведении анализа переходных процессов ЛОГОС.
22. Ударные спектры для максимального отклика от действия прямоугольного, треугольного, полусинусоидального импульсов для линейной системы.
23. Максимальные отклики системы с  $n$  степенями свободы от действия прямоугольного, треугольного, полусинусоидального импульсов спектральным методом.
24. Спектральный анализ в ЛОГОС.
25. Решение задач механики контактного взаимодействия в ЛОГОС.
26. Проведение расчетов быстротекущих процессов в модуле ЛОГОС.

### Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Ответ полный и правильный на основании изученной теории; теоретический материал и решение поставленных задач изложены в необходимой логической последовательности, грамотный научный язык; ответ самостоятельный. Могут быть допущены две-три несущественные ошибки, исправленные по требованию преподавателя.
не зачтено	Ответ обнаруживает непонимание студентом основного содержания учебного материала или допущены существенные ошибки, которые не могут быть исправлены при наводящих вопросах преподавателя.

### 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

1. Баженов Валентин Георгиевич. Методы граничных интегральных уравнений и граничных элементов в решении задач трехмерной динамической теории упругости с сопряженными полями. - М. : Физматлит : ННГУ, 2008. - 352 с. - (Библиотека Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского). - ISBN 978-5-9221-0953-6 : 105.00., 2 экз.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике : пер. с англ. / под ред. Б. Е. Победри. - М. : Мир, 1975. - 541 с. : ил. - 2.70., 2 экз.
3. Крауч Стивен. Методы граничных элементов в механике твердого тела / пер. с англ. М. А. Тлеужанова ; под ред. А. М. Линькова. - М. : Мир, 1987. - 328 с. : ил. - 1.70., 2 экз.
4. Маслов Л. Б. Конечно-элементные пороупругие модели в биомеханике / Маслов Л. Б. - Санкт-Петербург : Лань, 2022. - 240 с. - Книга из коллекции Лань - Физика. - ISBN 978-5-8114-1639-4., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=799955&idb=0>.

Дополнительная литература:

1. Численно-аналитическое моделирование динамики трехмерных составных пороупругих тел : учебно-методическое пособие / Л. А. Игумнов, С. Ю. Литвинчук, А. В. Аменицкий, А. А. Белов ;

ННГУ им. Н. И. Лобачевского. - Нижний Новгород : Изд-во ННГУ, 2012. - 52 с. - Текст : электронный., <https://e-lib.unn.ru/MegaPro/UserEntry?Action=FindDocs&ids=851314&idb=0>.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

1. ЛОГОС
2. Руководство пользователя ЛОГОС 5.4.19 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – URL: C:\Program Files\VNIEF\LOGOS-5.4.19\LOGOS- PP\5.4.19\Bin\docs\index.htm»

#### **7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)**

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечены доступом в электронную информационно-образовательную среду.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 15.03.03 - Прикладная механика.

Автор(ы): Петров Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 10.10.2023 г., протокол № 2.