

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

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Физика горных пород и математическое моделирование физических полей в геологической среде
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра прикладной геофизики
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 60 час.
- семинары: 0 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составили:

И.Б. Петров, д-р физ.-мат. наук, профессор
С.А. Тихоцкий, д-р физ.-мат. наук
И.О. Баяк, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры прикладной геофизики 28.01.2022

Аннотация

Курс посвящен разномасштабному моделированию эффективных физических свойств горных пород. В курсе рассматриваются основы теории эффективных сред, дается определение эффективных физических свойств горных пород, анизотропии физических свойств, проводится ознакомление с основами тензорной алгебры - математическим аппаратом, на котором основана теория эффективных сред. Рассматриваются понятия апскейлинга и даунскейлинга эффективных физических свойств. Изучаются теоретические основы построения методов, позволяющих определять эффективные физические свойства, в общем случае, анизотропных микронеоднородных сред. Рассматриваются причины анизотропии физических свойств горных пород в различных масштабах. Изучаются основные методы теории эффективных свойств, позволяющие определять эффективные упругих свойства как изотропных, так и анизотропных горных пород. Большое внимание уделяется методам расчета эффективных упругих свойств трещиноватых горных пород. Демонстрируются многочисленные примеры решения практических задач с использованием методов теории эффективных сред.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Знакомство с основами теории эффективных сред и методами расчета эффективных физических (в основном, упругих) свойств горных пород.

Задачи дисциплины

1. Получение студентами опыта использования аппарата теории эффективных сред для решения прикладных задач, связанных с определением эффективных физических свойств горных пород в различных масштабах, с учетом возможной анизотропии этих свойств.
2. Ознакомление студентов с основными этапами построения математических моделей эффективных физических свойств горных пород.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

базовые теоретические положения теории эффективных сред; основные этапы и принципы построения математических моделей эффективных физических свойств (в основном, упругих) горных пород с учетом их разномасштабного строения; основные методы расчета эффективных физических свойств горных пород.

уметь:

строить разномасштабные математические модели эффективных упругих свойств горных пород с учетом их анизотропии.

владеть:

математическим аппаратом теории эффективных сред; основными методами определения разномасштабных эффективных упругих свойств горных пород.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение	6			5
2	Основы тензорной алгебры и основные понятия теории упругости	8			5
3	Основы построения решения для эффективных упругих свойств микронеоднородных сред	16			5

4	Методы математического моделирования эффективных упругих свойств порово-трещиноватых сред	18			8
5	Математическое моделирование эффективных упругих свойств горных пород в масштабе сейсмических работ	12			7
Итого часов		60			30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение

Предмет теории эффективных сред. Понятия микро- и макромасштаба, представительного объема, статистической однородности. Понятие эффективной среды и эффективных физических свойств. Горная порода как микронеоднородная и макроскопически однородная среда. Разномасштабное строение горных пород. Основные масштабы изучения физических свойств горных пород – коллекторов углеводородов. Анизотропия и неоднородность. Причины анизотропии физических свойств горных пород в разных масштабах. Понятие математической модели эффективных физических свойств горных пород. Примеры построения разномасштабных математических моделей эффективных упругих свойств пород-коллекторов углеводородов.

2. Основы тензорной алгебры и основные понятия теории упругости

Понятие тензора. Ранг тензора. Примеры тензоров различного ранга. Свободные и немые индексы. Основные правила тензорной алгебры. Понятие тензорной свертки, примеры. Тензоры напряжений, деформаций. Тензоры упругости и податливости. Закон Гука для произвольной анизотропной среды. Симметрия тензоров напряжений, деформаций, упругости и податливости. Матричная запись тензора упругости. Типы упругой симметрии и примеры геофизических сред различных типов симметрии. Преобразование компонент тензора при повороте декартовой системы координат.

Тема самостоятельной работы студентов: запись свертки тензоров упругости и податливости через компоненты матриц упругости и податливости различного типа симметрии.

3. Основы построения решения для эффективных упругих свойств микронеоднородных сред

Общий подход к построению решения для эффективных упругих свойств. Физические основы методов Фойгта и Ройсса. Границы для эффективных модулей упругости произвольной анизотропной среды. Метод Фойгта-Ройсса-Хилла. Углы Эйлера. Эффективные упругие свойства поликристаллов.

Семестр: 2 (Весенний)

4. Методы математического моделирования эффективных упругих свойств порово-трещиноватых сред

Методы моделирования эффективных упругих свойств изотропных порово-трещиноватых сред, включая породы – коллекторы углеводородов. Методы моделирования, основанные на решении Эшелби, применимые для общего случая анизотропных сред. Специальные методы для моделирования эффективных анизотропных упругих свойств пород с ориентированными флюидонасыщенными трещинами. Параметры Томсена. Расчет скоростей упругих волн в анизотропных средах.

Тема самостоятельной работы студентов: расчет границ эффективных модулей упругости и скоростей упругих волн для моделей коллекторов-углеводородов методами Фойгта и Ройсса. Расчет эффективных модулей упругости и скоростей упругих волн для моделей изотропных пород – коллекторов углеводородов различными методами.

5. Математическое моделирование эффективных упругих свойств горных пород в масштабе сейсмических работ

Тонкослоистые среды. Метод Бейкуса. Решение задачи флюидозамещения: методом Гассмана для изотропных пород, методом Брауна-Корринги для анизотропных пород.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теория упругости микронеподобных сред [Текст]/Т. Д. Шермергор, -М., Наука, 1977
2. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления [Текст]/Н. Е. Кочин , -М., Наука, 1965
3. Теория упругости [Текст] / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер; пер. с англ. М. И. Рейтмана; под ред. Г. С. Шапиро - М.Наука,1979
4. Теория упругих волн в кристаллах [Текст]/Ф. И. Федоров, -М., Наука, 1965
5. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. 2nd Edition. Tools for Seismic Analysis of Porous Media. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. - 511 p.
6. Mavko G., Mukerji T., Dvorkin J. The Rock Physics Handbook. 3rd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2020. - 741 p.

Дополнительная литература

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <https://runeft.ru/search/?q=%D0%B3%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BC%D0%B8&how=r>
2. <https://runeft.ru/search/?q=%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D0%BD%D0%B0&how=r>
3. <https://ntc.gazprom-neft.ru/search/?q=%D0%B1%D0%B0%D1%8E%D0%BA>
4. https://www.researchgate.net/profile/Irina_Bayuk
5. https://www.researchgate.net/profile/Lev_Vernik
6. https://www.researchgate.net/profile/Jack_Dvorkin

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Подготовленные составителем программы презентации по всем темам (суммарно ~ 500 слайдов).

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач. Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра прикладной геофизики
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчики:

И.Б. Петров, д-р физ.-мат. наук, профессор
С.А. Тихоцкий, д-р физ.-мат. наук
И.О. Баяк, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика горных пород и математическое моделирование физических полей в геологической среде» обучающийся должен:

знать:

базовые теоретические положения теории эффективных сред; основные этапы и принципы построения математических моделей эффективных физических свойств (в основном, упругих) горных пород с учетом их разномасштабного строения; основные методы расчета эффективных физических свойств горных пород.

уметь:

строить разномасштабные математические модели эффективных упругих свойств горных пород с учетом их анизотропии.

владеть:

математическим аппаратом теории эффективных сред; основными методами определения разномасштабных эффективных упругих свойств горных пород.

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

Примеры заданий для самостоятельной работы студентов:

- 1) Выразить через компоненты матрицы упругости выражение для произвольной среды гексагональной сингонии. (по Теме 2).
- 2) Выразить через компоненты матрицы упругости произвольного тела удвоенную плотность упругой энергии при равенстве нулю всех компонент тензора деформации, кроме диагональных. Упругие свойства тела относятся к орторомбической симметрии. (по Теме 2).
- 3) Определить границы Фойгта и Ройсса для модели карбонатного коллектора, представляющего собой карбонатную матрицу со свойствами поликристалла кальцита и пустотами, заполненными пластовой водой. (по Теме 4).
- 4) Определить методом Берримана эффективные модули всестороннего объемного сжатия и сдвига для модели карбонатного коллектора, представляющего собой карбонатную матрицу со свойствами поликристалла кальцита и сферическими порами, заполненными газом. (по Теме 4).

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

Перечень контрольных вопросов

1. Какие индексы можно переставлять в индексной записи тензора упругости?
2. Задача определения матричной пористости по данным сейсмоки относится к задаче апскейлинга или даунскейлинга?
3. К какому типу симметрии относятся упругие свойства пласта, составленного из 100 тонких изотропных горизонтальных слоев?
4. Методом Берримана получен модуль всестороннего объемного сжатия меньше граничного значения Ройсса. Можно ли это считать ошибкой расчета?
5. Верно ли утверждение, что для определения коэффициента Пуассона изотропной среды достаточно лишь знать скорости продольной и поперечной упругих волн? Верно ли такое утверждение для модуля Юнга?
6. Сколько независимых модулей упругости нужно для полной характеристики упругих свойств среды типа VTI?
7. Что такое математическая модель эффективных физических свойств породы?

Примеры контрольных заданий

1. Выразить через компоненты матрицы упругости удвоенную плотность упругой энергии анизотропной горной породы при равенстве нулю всех компонент тензора деформации, кроме диагональных. Упругие свойства породы относятся к гексагональной симметрии.
2. Выразить через компоненты матрицы упругости выражение для произвольной среды симметрии типа VTI.
3. Рассчитать параметры Томсена для заданной матрицы эффективных упругих свойств трещиноватой породы.

4. Построить модельную среду для породы-коллектора углеводородов заданной микроструктуры (по фото растровой электронной микроскопии и шлифов). Параметризовать модель. Подобрать уравнения связи между параметрами модели и эффективными упругими свойствами.

5. Методами Фойгта и Ройсса определить граничные значения модулей упругости для терригенного коллектора углеводородов с заданным типом насыщения пустотного пространства и заданным минеральным составом в диапазоне пористости от 0 до 30 %.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Дифференцированный зачёт проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.