

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физико-механические свойства и разрушение горных пород
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра прикладной геофизики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 15 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: Н.В. Дубиня, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры прикладной геофизики 28.01.2022

## Аннотация

Курс посвящен особенностям определения физико-механических свойств горных пород на основании комплексирования результатов сейсмических, геофизических и лабораторных исследований, а также изучению процессов хрупкого и пластического разрушения горных пород. В рамках курса проходит теоретическое изучение основных реологических моделей, разработанных для описания механического поведения горных пород, проводятся работы по непосредственному определению реологических свойств горных пород в лабораторных условиях. Отдельное внимание посвящено процессам зарождения и развития трещиноватости в горных породах, подверженных внешнему нагружению, определяются основные закономерности между историей напряженно-деформированного состояния горной породы и ее внутренним строением, основными тенденциями при разрушении. Значительную часть курса составляют лабораторные исследования, выполняемые студентами на сервогидравлической установке высокого давления RTR-4500 (ИФЗ РАН), под руководством ведущих специалистов.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Теоретическое и экспериментальное знакомство с физическими процессами, протекающими при разрушении горных пород, аппаратом, описывающим пластическое и хрупкое разрушение.

### Задачи дисциплины

1. Получение студентами опыта использования аппарата механики сплошных сред для математического описания критического механического поведения горных пород;
2. Знакомство с экспериментальными методами изучения процессов разрушения.

## 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:

- основные теоретические модели, описывающие механическое поведение горных пород при нагрузках, превышающих пределы прочности;
- теоретические и экспериментальные методы определения прочностных свойств горных пород.

уметь:

- планировать испытания, необходимые для математического описания процессов механического разрушения образцов горных пород;
- применять математический аппарат описания процесса разрушения с использованием экспериментальных данных.

владеть:

- математическим аппаратом описания механических процессов, сопровождающих хрупкое и нехрупкое разрушение гетерогенных сред.

### 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	2			2
2	Основные понятия механики сплошных сред	8	2		8
3	Определение механических свойств горных пород	8	2	6	8
4	Теории прочности	2	3		2

5	Критерии разрушения горных пород	7	4	4	7
6	Паспорт прочности горной породы	3	4	5	3
Итого часов		30	15	15	30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

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

##### Семестр: 2 (Весенний)

###### 1. Введение

Понятие разрушения. Пределы применимости механики сплошных сред. Понятие о горных породах как о неоднородных гетерогенных средах.

###### 2. Основные понятия механики сплошных сред

Смещения, деформации и напряжения. Тензор конечных и малых деформаций, связь с вектором смещения. Объемные и поверхностные силы. Постулат, лемма и теорема Коши. Симметричность тензоров деформаций и напряжений. Главные напряжения, главные деформации. Система уравнений механики сплошных сред. Связь между напряжениями и деформациями. Реологические соотношения. Ползучесть, пластичность.

###### 3. Определение механических свойств горных пород

Линейно-упругое тело. Закон Гука в общем виде. Закон Гука для анизотропных тел. Определение основных упругих модулей. Теоретическое обоснование закона Гука. Методы экспериментального исследования механических свойств образцов горных пород. Трехосный и истинно-трехосный тесты. Методы экспериментального определения напряжений, деформаций. Кривая нагружения, проблема выделения линейного участка. Обоснование нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями. Проведение лабораторных работ по определению упругих модулей образцов горных пород с использованием экспериментальной базы центра петрофизических и геомеханических исследований ИФЗ РАН.

###### 4. Теории прочности

Задача разрушения сплошной среды. Исторические критерии разрушения. Критерии разрушения, наиболее часто использующиеся в механике горных пород. Критерий Кулона-Мора и его ограничения.

###### 5. Критерии разрушения горных пород

Критерий Лоде-Надаи. Влияние промежуточного главного напряжения на предел прочности. Хрупкое поведение горных пород при разрушении. Индекс хрупкости. Развитие трещин при разрушении. Формула Гриффитса. Силовой и энергетический подходы к описанию разрушения. Коэффициенты интенсивности напряжений. Интеграл Черепанова-Райса. Три вида трещин. Трещиностойкость. Бразильский тест. Механическое поведение горной породы после разрушения. Проведение лабораторных работ по определению прочностных свойств образцов горных пород с использованием экспериментальной базы центра петрофизических и геомеханических исследований ИФЗ РАН.

###### 6. Паспорт прочности горной породы

Определение паспорта прочности горной породы по результатам экспериментальных исследований. Многостадийное испытание. Упрочнение. Связь между пределом упругости и пределом прочности. Дилатансия. Процедура построения паспорта прочности для различных критериев разрушения. Проведение лабораторных работ по построению паспортов прочности образцов горных пород с использованием экспериментальной базы центра петрофизических и геомеханических исследований ИФЗ РАН.

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

Программа курса подразумевает лабораторные исследования, выполняемые студентами на сервогидравлической установке высокого давления RTR-4500 (ИФЗ РАН), под руководством ведущих специалистов. На установке выполняются эксперименты по сжатию образцов горных пород.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Деформационные процессы в массивах горных пород [Текст] : учеб. пособие для вузов / Г. Г. Кочарян ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2011 .— 366 с.
2. Механика разрушения композиционных материалов [Текст]/Г. П. Черепанов, -М., Наука, 1983
3. Механика обобщенно-пластических сред [Текст] : учеб. пособие для вузов / И. В. Ширко ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : Изд-во МФТИ, 2007 .— 156 с.

### **Дополнительная литература**

1. Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R. Petroleum related rock mechanics. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2008. 515 p.
2. Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of rock mechanics. 4th ed. Oxford: Blackwell publishing, 2007. 489 p.
3. Zoback M.D. Reservoir geomechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 505 p.

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

Не используются

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

Презентации по темам программы. Методики проведения лабораторных испытаний горных пород.

## **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:** 1  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** Н.В. Дубиня, канд. 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 «Физико-механические свойства и разрушение горных пород» обучающийся должен:



**знать:**

- основные теоретические модели, описывающие механическое поведение горных пород при нагрузках, превышающих пределы прочности;
- теоретические и экспериментальные методы определения прочностных свойств горных пород.

**уметь:**

- планировать испытания, необходимые для математического описания процессов механического разрушения образцов горных пород;
- применять математический аппарат описания процесса разрушения с использованием экспериментальных данных.

**владеть:**

- математическим аппаратом описания механических процессов, сопровождающих хрупкое и нехрупкое разрушение гетерогенных сред.

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

Пример задания контрольной работы:

1. По результатам многостадийного испытания были получены следующие пределы упругости цилиндрического образца, помещенного в обстановку псевдотрехосного сжатия: 50 МПа при радиальном напряжении 10 МПа, 70 МПа при радиальном напряжении 20 МПа; предел прочности составляет 100 МПа при радиальном напряжении 20 МПа. Определить угол внутреннего трения и предел прочности на одноосное сжатие данного образца.

Пример задачи домашнего задания:

1. Показать эквивалентность энергетического и силового подхода к описанию распространения плоской трещины в обстановке одноосного растяжения вдоль оси, нормальной к плоскости трещины.

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

Перечень контрольных вопросов

1. Какими физическими процессами можно объяснить нелинейность связи между напряжением и деформацией горной породы?
2. Перечислить классические теории прочности. Какие из них и при каких условиях эквивалентны друг другу?
3. Каковы плюсы и минусы контроля деформаций при проведении испытаний по псевдотрехосному сжатию. Каковы плюсы и минусы контроля по напряжениям?
4. Почему поворот трещины отрыва с необходимостью сопровождается развитием трещин сдвига?
5. Чем обусловлено существование различных способов оценки хрупкости породы? Могут ли результаты применения разных способов противоречить друг другу?

Примеры контрольных заданий

1. Выбрать оптимальный критерий разрушения на основании результатов многостадийных испытаний по трехосному сжатию, данных в виде таблицы «критическое осевое напряжение – радиальное напряжение».
2. Определить параметры критерия разрушения для данных вопроса 1.
3. Определить критическую длину неустойчивого роста трещины отрыва, находящейся под постоянным внутренним давлением.
4. Определить угол внутреннего трения горной породы, подчиняющейся линейному критерию Кулона-Мора, по фотографии образца после разрушения в условиях псевдотрехосного сжатия.
5. Определить главные значения и главные направления тензора напряжений, соответствующих заданному тензору деформаций при известных упругих модулях линейно-изотропной среды.

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.