

**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:	Геомеханика месторождений
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:

2 (весенний) - Дифференцированный зачет

3 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 75 всего, в том числе:

лекции: 45 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 15 час.

Самостоятельная работа: 105 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

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

Программа обсуждена на заседании кафедры прикладной геофизики 15.03.2021

Аннотация

Курс посвящен решению прикладных задач геомеханики месторождений углеводородов, все чаще возникающих на различных стадиях освоения и разработки месторождений. В первой части курса рассматриваются теоретические основы геомеханики месторождений: рассматриваются основные положения механики сплошных сред, механики деформируемого твердого тела. Эта часть курса является естественным продолжением курса «Механика сплошных сред», изучаемого в первом семестре: отдельное внимание уделяется особенностям механики горных пород, являющихся неоднородными гетерогенными насыщенными средами с нелинейной реологией.

После изучения теоретических основ геомеханики месторождений рассматриваются такие вопросы как построение модели механических свойств массива горных пород по данным геофизических исследований и геомеханическое моделирование. В рамках курса детально рассматривается процесс одномерного геомеханического моделирования, описывается способ получения необходимых данных, их интерпретация и возникающие неоднозначности. Также описываются основные подходы, использующиеся при трехмерном и четырехмерном геомеханическом моделировании.

В заключительной части курса описывается использование результатов геомеханического моделирования для решения прикладных задач геомеханики месторождений: расчета устойчивости ствола скважины, прогноза осложнений при бурении, оптимизации дизайна гидроразрыва пласта, прогноза выноса песка и проседания земной поверхности при разработке нефтегазовых месторождений, построение модели трещиноватости.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Знакомство с основными проблемами современной геомеханики в приложении к задачам разработки месторождений углеводородов, формирование представления об основных этапах геомеханического моделирования и особенностях математического описания механического поведения массивов горных пород.

Задачи дисциплины

Дисциплина направлена на решение следующих задач:

1. Получение студентами опыта использования аппарата механики сплошных сред для решения прикладных задач геомеханики месторождений;
2. Ознакомление студентов с основными этапами геомеханического моделирования.

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 механики деформируемого твердого тела;
основные этапы построения модели механических свойств массива горных пород по данным разномасштабных геофизических исследований;
основные подходы к расчету напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

уметь:

планировать предварительные исследования, требующиеся для получения достоверных решений прикладных задач геомеханики месторождений углеводородов;
строить модель механических свойств массива горных пород по результатам геофизических исследований;
рассчитывать пространственные распределения напряжений и деформаций в массиве горных пород;
решать основные прикладные задачи геомеханики месторождений углеводородов: рассчитывать устойчивость ствола скважины, прогнозировать геометрию трещины гидроразрыва пласта, прогнозировать зоны развитой трещиноватости.

владеть:

математическим аппаратом механики сплошных сред, использующимся при решении прикладных задач месторождений углеводородов.

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			5
2	Теоретические основы геомеханики	8	5		10
3	Реология и трещиноватость горных пород	10	7		20
4	Моделирование полей напряжений	10	3		10
5	Расчет устойчивости ствола скважины	5		10	12
6	Геомеханика и гидроразрыв пласта	3		2	12
7	Вынос песка	2		3	12
8	Проседание земной поверхности	2			12
9	Динамические процессы при разработке	3			12
Итого часов		45	15	15	105
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Введение

Предмет и актуальные задачи геомеханики месторождений, современная стадия развития методов решения прикладных задач геомеханики месторождений.

2. Теоретические основы геомеханики

Основные понятия механики деформируемого твердого тела: скалярные, векторные и тензорные величины; напряжения и деформации. Замкнутая система уравнений механики сплошных сред. Проблема определяющих соотношений. Темы семинаров: решение нескольких задач теории упругости.

3. Реология и трещиноватость горных пород

Проблема учета насыщающего породу флюида при решении задач механики, модель пороупругости. Нелинейность реологии горных пород. Критерии разрушения, ассоциированные и неассоциированные законы пластического течения. Развитие трещиноватости в горных породах по мере изменения их напряженно-деформированного состояния. Естественная трещиноватость. Темы семинаров: решение нескольких задач теории пластичности и пороупругости.

4. Моделирование полей напряжений

Проблема моделирования полей напряжений в массивах горных пород: математическая постановка начальных и граничных условий в задачах геомеханики. Скважинные методы изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Этапы реконструкции профилей напряжений в породах околоскважинного пространства и методы трехмерного моделирования полей напряжений и деформаций. Темы семинаров: интерпретация данных скважинных исследований для реконструкции профилей напряжений вдоль вертикальных и наклонных скважин.

5. Расчет устойчивости ствола скважины

Использование результатов реконструкции профилей напряжений для прогноза проявлений при бурении и выработки рекомендаций по подбору плотности бурового раствора. Механические процессы при бурении: образование вывалов и трещин растяжения. Бурение наклонно-направленных и горизонтальных скважин. Роль тектонических напряжений в расчете устойчивости ствола скважины. Темы семинаров: расчет плотности бурового раствора при бурении вертикальных, наклонных и горизонтальных скважин в породах с различными условиями залегания.

6. Геомеханика и гидроразрыв пласта

Технология гидроразрыва пласта, оптимизация дизайна гидроразрыва, существующие модели, использующиеся для математического описания зарождения и развития трещины гидроразрыва, взаимодействия трещин многостадийного гидроразрыва между собой. Темы семинаров – расчет нескольких простых задач хрупкого разрушения – развития трещины раскрытия, находящейся под внутренним давлением.

7. Вынос песка

Модели, описывающие процесс выноса твердой фазы при добыче нефти и газа. Использование закона пластического течения для описания механического поведения пород околоскважинного пространства при разработке месторождения. Содержание семинаров: выбор режима работы скважины, не допускающего вынос твердой фазы для различных условий залегания пород, слагающих месторождения.

8. Проседание земной поверхности

Взаимосвязи между напряженно-деформированным состоянием пород, слагающих месторождения углеводородов, и вышележащих пород. Проблема концентрации напряжений во вмещающих породах. Возможность прогноза изменения рельефа над разрабатываемыми месторождениями углеводородов.

9. Динамические процессы при разработке

Четырехмерное геомеханическое моделирование, совмещение гидродинамического и геомеханического моделирования, существующие методы совмещения. Влияние геомеханических эффектов на динамику добычи и его физические основы – изменения фильтрационно-емкостных свойств горных пород при изменении их напряженно-деформированного состояния.

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. 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. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 7 : Теория упругости : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц .— 4-е изд., испр. и доп. — М. : Наука, 1987 .— 248 с.

3. Теория пластичности [Текст] : [учебное пособие для вузов] : рек. М-вом высш. и средн. спец. образования СССР / В. В. Соколовский .— 3-е изд., доп. — М : Высш. школа, 1969 .— 608 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)

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

Разработанные составителем программы расчетные модули в Excel для проведения семинарских занятий.

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

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 2 (весенний) - Дифференцированный зачет
- 3 (осенний) - 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 «Геомеханика месторождений» обучающийся должен:

знать:

базовые теоретические положения механики деформируемого твердого тела;
основные этапы построения модели механических свойств массива горных пород по данным разномасштабных геофизических исследований;
основные подходы к расчету напряженно-деформированного состояния массива горных пород.

уметь:

планировать предварительные исследования, требующиеся для получения достоверных решений прикладных задач геомеханики месторождений углеводородов;
строить модель механических свойств массива горных пород по результатам геофизических исследований;
рассчитывать пространственные распределения напряжений и деформаций в массиве горных пород;
решать основные прикладные задачи геомеханики месторождений углеводородов: рассчитывать устойчивость ствола скважины, прогнозировать геометрию трещины гидроразрыва пласта, прогнозировать зоны развитой трещиноватости.

владеть:

математическим аппаратом механики сплошных сред, использующимся при решении прикладных задач месторождений углеводородов.

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

Пример задания контрольной работы: Согласно результатам лабораторных исследований на керне с некоторого месторождения, коэффициент внутреннего трения флюидонасыщенной породы составляет 0.6, коэффициент Пуассона 0.3, а коэффициент Био 0.9. Согласно комплексу исследований, месторождение пребывает в спокойной тектонической обстановке, тектонические силы малы, причин проявления на рассматриваемой глубине (2 км) аномально высокого пластового давления нет. Следует ли ожидать существенного вклада естественных трещин в фильтрационные свойства породы?

Пример задачи домашнего задания: Определить возможные доли флюидопроводящих трещин в горной породе, находящейся в обстановке сбросового тектонического режима на глубине 2200 м, если давление закрытия трещины гидроразрыва, проведенного на той же глубине составило 30 МПа. Средняя плотность вышележащих пород составляет 2600 кг/м³.

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

10 семестр:

1. Что происходит с кривой напряжение-деформации после преодоления предела упругости? Предела пластичности? Предела прочности?
2. Какие существуют методы оценки минимального горизонтального напряжения по скважинным данным? Максимального горизонтального напряжения? Комбинации главных горизонтальных напряжений?
3. Как изменяются фильтрационно-емкостные свойства породы по мере роста эффективных напряжений? По мере накопления пластических деформаций?
4. Найти эффективный модуль трехслойной изотропной упругой среды, если даны упругие модули каждого слоя
5. Найти связь между скоростями пробега продольных и поперечных упругих волн с модулем Юнга, коэффициентом Пуассона для изотропной среды

11 семестр:

1. Какие факторы обуславливают флюидопроводимость естественных сдвиговых трещин?
2. В каких предположениях справедлива формула Динника для оценки горизонтальных напряжений?
3. В каком направлении развивается трещина гидроразрыва?

4. Известны значения эффективных горизонтальных напряжений на двух заданных глубинах в однородном изотропном пласте с известными упругими модулями и пределом прочности. Определить плотность бурового раствора, при использовании которой для бурения скважины начнется проявление вывалообразования. Определить плотность раствора, соответствующую началу развития трещины раскрытия.
5. Определить траекторию бурения скважины в однородном изотропном пласте с равномерным распределением трещин в слагающих его породах, приводящую к раскрытию максимального количества естественных трещин. Дана глубина и соотношения между главными напряжениями.
6. Определить длину, на которую разовьется трещина, развивающаяся в поле заданных тектонических напряжений, если профиль давления в трещине представляется заданной ступенчатой функцией.

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 недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо 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 твёрдо 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.