

**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-технические процессы при бурении и геонавигация
<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>	2
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 3 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

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

Программа обсуждена на заседании кафедры прикладной геофизики 28.01.2022

## Аннотация

В курсе детально рассмотрены механические процессы, протекающие в ходе бурения скважин. Бурение скважины с механической точки зрения представляет собой процесс резкого техногенного нарушения сплошности горных пород, являющихся неоднородными гетерогенными средами. В процессе бурения возникает ряд контактных задач теории вязкоупругопластичности, решение которых сопряжено со значительными теоретическими, методическими и вычислительными трудностями. В то же время, для того, чтобы процессы бурения протекали безаварийно, необходимо иметь способы решения таких задач. В рамках курса будут представлены основные подходы, использующиеся сейчас на практике для прогнозирования физических и технологических процессов при бурении, а также обозначены основные направления развития этой области, представляющиеся приоритетными на сегодняшний момент.

Отдельное внимание в рамках дисциплины уделяется геонавигации – задаче уточнения планируемой траектории скважины в ходе бурения с целью ее оптимизации. На данный момент большинство существующих решений этих задач являются инженерными, требующими дополнительного осмысления и использования научных подходов для преодоления существующих проблем. Цель курса – ознакомить слушателей с этими проблемами и предложить направления, в которых знания, полученные в ходе обучения в МФТИ, могут быть использованы со значительной практической отдачей. В заключительной части курса рассматриваются особенности бурения на шельфовых месторождениях.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- знакомство с физическими процессами, протекающими в ходе бурения скважин, понятием и основными задачами геонавигации; ознакомление с основными существующими подходами решения конкретных задач и направлениями их развития.

### Задачи дисциплины

- получение студентами понимания контактных задач теории вязкоупругопластичности и путей их решения;
- ознакомление студентов с технологическими процессами при бурении;
- получение студентами понимания задачи геонавигации и путей ее решения.

## 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

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные физические процессы, протекающие в ходе бурения;
- постановку контактных задач теории вязко-упруго-пластичности;
- основные проблемы, возникающие в ходе бурения, и существующие пути их решения.

уметь:

- использовать стандартные методы определения рисков при бурении;
- рассчитывать концентрацию напряжений в окрестности скважины для различных условий как бурения, так и условий залегания пород;
- выбирать оптимальные методы решения задач геонавигации и применять их.

владеть:

- математическим аппаратом механики сред, характеризующихся вязко-упруго-пластической реологией, аппаратом решения контактных задачи.

### 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	1			1
2	Задача Кирша	3			1
3	Бурение в породах со сложной реологией	8			4

4	Бурение наклонно-направленных скважин	2			1
5	Контактная задача при бурении	4			2
6	Оптимизация траектории бурения. Геонавигация	6			3
7	Бурение скважин на шельфе	6			3
Итого часов		30			15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

##### Семестр: 3 (Осенний)

###### 1. Введение

Бурение скважин. Основные технологические процессы. Риски при бурении.

###### 2. Задача Кирша

Проблема концентрации напряжений. Плоская задача теории упругости. Функция Эйри. Концентрация напряжений в окрестности круглого отверстия при растяжении тонкой линейно-упругой изотропной пластины: аналитическое решение Кирша. Концентрация напряжений в тонкой линейно-упругой изотропной пластине, подвергаемой двухосному сжатию. Концентрация напряжений при сдвиге. Учет трех главных напряжений при переходе к псевдотрехмерному случаю. Случай нормального давления на границе отверстия. Давление и плотность бурового раствора.

###### 3. Бурение в породах со сложной реологией

Разрушение в области концентрации напряжений. Механизмы хрупкого разрушения пород околоскважинной зоны. Вывалообразование и инициация трещин растяжения. Пластические деформации в области концентрации напряжений. Аналитическое решение задачи концентрации напряжений при двухосном сжатии тонкой упруго-пластической пластины. Сшивка аналитических решений на контакте упругой и пластической областей. Концентрация напряжений в псевдотрехмерном случае. Концентрация напряжений в анизотропном случае. Несовпадение плоскостей симметрии анизотропной среды и направлений главных напряжений – влияние на области разрушения околоскважинной зоны. Вывалообразование для различных критериев разрушения. Вязкоупругий случай: задача Кирша при растяжении тонкой вязкоупругой пластины. Принцип Вольтерра. Замкнутая система уравнений, определяющая концентрацию напряжений для случая анизотропной вязко-упруго-пластической среды.

###### 4. Бурение наклонно-направленных скважин

Несовпадение главной оси тензора напряжений и оси скважины. Переход от тектонических напряжений к главным напряжениям в околоскважинном пространстве. Пространственная ориентация вывалов и трещин растяжения в наклонно-направленных скважинах.

###### 5. Контактная задача при бурении

Бурение как динамический процесс. Изменение напряженного состояния пород околоскважинной зоны в ходе бурения. Строгая постановка контактной задачи с учетом эволюции границы нарушения сплошности горной породы. Переход к динамическому случаю уравнений, определяющих концентрацию напряжений для случая анизотропной вязко-упруго-пластической среды и частных случаев. Методы решения контактной задачи: численное моделирование и инженерные подходы.

#### 6. Оптимизация траектории бурения. Геонавигация

Риски при бурении. Анализ неопределенности, источники ошибок в исходных данных. Количественная вероятностная оценка рисков при бурении. Предбуровая модель и ее актуализация при получении новых данных. Выбор оптимальной траектории бурения. Бурение в приразломных зонах. Различие между наиболее безопасной траекторией и траекторией, допускающих наибольшую добычу. Геонавигация. Технологические решения для определения текущей траектории скважины. Источники дополнительных данных при бурении. Бурение горизонтальных скважин в тонких слоях. Заканчивание скважин.

#### 7. Бурение скважин на шельфе

Буровые установки для проведения шельфовых работ: виды и особенности. Реологические свойства верхней части разреза. Задача взаимодействия донного грунта и опор буровой установки. Риски эксплуатации буровых установок на шельфе. Инженерные подходы и математическое моделирование контакта опор установки и донного грунта. Внешние ветро-волновые и сейсмические воздействия на буровую установку. Риск реализации необратимых механических процессов на морском дне. Области аномально высокого давления флюида в верхней части разреза.

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

Аудитория с компьютерами. Компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, интерактивная доска).

### 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 / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, М., Наука, 1987, 2003, 2007
3. Теория пластичности [Текст], [монография]/В. В. Соколовский, -М. ; Л., Изд-во технико-теорет.лит., 1950

#### Дополнительная литература

1. Реология [Текст]/М. Рейнер , -М., Наука, 1965
2. Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R. Petroleum related rock mechanics. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2008. 515 p.
3. Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of rock mechanics. 4th ed. Oxford: Blackwell publishing, 2007. 489 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 темам.

## **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:** 2  
**квалификация:** магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 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

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физико-технические процессы при бурении и геонавигация» обучающийся должен:

**знать:**

- основные физические процессы, протекающие в ходе бурения;
- постановку контактных задач теории вязко-упруго-пластичности;
- основные проблемы, возникающие в ходе бурения, и существующие пути их решения.



**уметь:**

- использовать стандартные методы определения рисков при бурении;
- рассчитывать концентрацию напряжений в окрестности скважины для различных условий как бурения, так и условий залегания пород;
- выбрать оптимальные методы решения задач геонавигации и применять их.

**владеть:**

- математическим аппаратом механики сред, характеризующихся вязко-упруго-пластической реологией, аппаратом решения контактных задачи.

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

Пример задания контрольной работы:

1. определить наиболее безопасное направление бурения, протекающего в среде в обстановке сдвигового тектонического режима, относительно главных осей тензора тектонических напряжений.

Пример задачи домашнего задания:

1. Вертикальная скважина бурится в линейно-упругой среде, свойства которой: модуль Юнга 50 ГПа, коэффициент Пуассона 0.3, предел прочности на одноосное сжатие 200 МПа, предел прочности на одноосное растяжение 15 МПа, угол внутреннего трения  $30^\circ$  (среда подчиняется модифицированному критерию разрушения Кулона-Мора), средняя плотность 2600 кг/м<sup>3</sup>, зоны аномально высокого пластового давления отсутствуют, горизонтальные напряжения линейно растут с глубиной. На глубине 1 км был проведен тест на приемистость, по результатам которого был сделан вывод о том, что минимальное горизонтальное напряжение составляет 40% от вертикального. Рассчитать максимальное горизонтальное напряжение и безопасный коридор плотности бурового раствора если известно, что при бурении на постоянной плотности 1500 кг/м<sup>3</sup> были обнаружены первые признаки вывалообразования.

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

Перечень контрольных вопросов

1. Чем отличается классическая задача Кирша от задачи концентрации напряжений в окрестности скважины?
2. Почему решение задачи Кирша остается справедливым и для вязко-упругих пород при вводе эффективных упругих модулей, зависящих от времени?
3. Чем определяются минимально и максимально допустимые значения плотности бурового раствора?
4. В каком направлении риски бурения минимальны? Максимальны?
5. Какие особенности определяют сложности при бурении, характерные для освоения шельфовых месторождений?

Примеры контрольных заданий

1. Определить наиболее безопасную траекторию бурения наклонной скважины для пласта с известными упруго-прочностными свойствами и условиями залегания.
2. Рассчитать допустимые значения плотности бурового раствора для бурения вертикальной скважины в упруго-пластической среде с известными реологическими свойствами и условиями залегания.
3. Вывести решение задачи Кирша для двухосного растяжения.
4. Построить кривую вероятностей рисков при бурении на основании объема данных о лабораторных и геофизических исследованиях свойств пород, через которые планируется бурение.
5. Обосновать несоответствие между траекторией скважины, допускающей минимальные риски, и траекторией, предполагающей наилучшую динамику добычи.

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.