

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

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Директор физтех-школы**  
**аэрокосмических технологий**  
**С.С. Негодяев**

|                            |   |
|----------------------------|---|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>  |
| <b>по дисциплине:</b>      | Флюидодинамика нефтегазоносных пластов  |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика  |
| <b>профиль подготовки:</b> | Фундаментальная и прикладная физика природных систем<br>Физтех-школа Аэрокосмических Технологий<br>кафедра теоретической и экспериментальной физики геосистем |
| <b>курс:</b>               | 1   |
| <b>квалификация:</b>       | магистр   |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составил: А.А. Спивак, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической и экспериментальной физики геосистем 04.06.2020

## Аннотация

Курс направлен на формирование базовых знаний по подземной гидравлике, отдельных разделов общей геофизики для понимания основного перечня задач научных исследований и работ в области фильтрации флюидов в массивах горных пород, формирование навыков научных исследований и способности применять полученные знания на практике. В процессе обучения студенты знакомятся с фундаментальными законами геофизики, основными свойствами и закономерностями фильтрационных течений подземных флюидов, моделями проницаемых сред, основными законами фильтрации и условиями их выполнения, порядками численных величин, характеризующих движение флюидов в проницаемых средах, а так же современными проблемами подземной флюидодинамики. В рамках курса слушателям даются базовые знания по подземной гидравлике (основным законам и условиях фильтрационных течений флюидов в проницаемом пространстве твердой среды). Курс включает теоретические занятия, а также самостоятельную практическую проработку полученных навыков.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по подземной гидравлике, отдельных разделов общей геофизики для понимания основного перечня задач научных исследований и работ в области фильтрации флюидов в массивах горных пород, формирование навыков научных исследований и способности применять полученные знания на практике.

### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания по подземной гидравлике (основным законам и условиях фильтрационных течений флюидов в проницаемом пространстве твердой среды);
- научить студентов на примерах современных подходов к описанию фильтрационных течений выполнять оценки технологических параметров скважин и описывать движение флюида в проницаемых средах, практического использования полученных знаний в целях описания характеристик нефте- и газодобычи.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции  | Индикаторы достижения компетенции   |
|---|---|
| УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации  | УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения |
| ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи  | ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость   |
| 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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов                     |
| 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-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию | ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива |
|---|---|

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные законы геофизики, основные свойства и закономерности фильтрационных течений подземных флюидов, модели проницаемых сред, основные законы фильтрации и условия их выполнения;
- порядки численных величин, характеризующих движение флюидов в проницаемых средах;
- современные проблемы подземной флюидодинамики.

уметь:

- пользоваться полученными знаниями для определения основных параметров, характеризующих движение газа и жидкости в проницаемых массивах горных пород;
- уметь правильно сопоставлять результаты теоретических расчетов с результатами инструментальных наблюдений;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в задачах подземной гидравлики физическое содержание;
- осваивать новые области подземной гидравлики и анализировать натурные данные;
- оценивать достоверность и точность получаемых результатов.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования сейсмологических задач;
- навыками грамотной обработки натурных данных и сопоставления их с теоретическими результатами;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач подземной гидравлики.

### 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                     | Свойства флюидов в проницаемом пространстве горных пород.               | 5   | 5        |                 | 4              |
| 2                     | Модели проницаемой среды.   | 3   | 3        |                 | 4              |
| 3                     | Законы фильтрации флюидов.  | 4   | 4        |                 | 3              |
| 4                     | Феноменологическое описание фильтрации флюидов в массивах горных пород. | 3   | 3        |                 | 4              |
| Итого часов           |   | 15  | 15       |                 | 15             |
| Подготовка к экзамену |   | 0 час.  |          |                 |                |
| Общая трудоёмкость    |   | 45 час., 1 зач.ед.  |          |                 |                |

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

1. Свойства флюидов в проницаемом пространстве горных пород.

Основные структурные характеристики горных пород.

Свойства жидкостей.

Описание движения флюидов на микро и макро уровне.

Молекулярное течение флюида.

Взаимодействие флюида с поверхностью проницаемых каналов.

2. Модели проницаемой среды.

Капиллярная и трещинная модели проницаемой среды.

Модель Слехтера.

Распределение проницаемых каналов по размеру.

Пористость среды, извилистость и степень перекрытия каналов фильтрации флюида.

Связь объемной пористости среды с просветностью.

3. Законы фильтрации флюидов.

Уравнения движения флюидов в отдельно взятом канале.

Уравнение фильтрации флюида (закон Дарси).

Пределы применимости линейного закона фильтрации.

Уравнение фильтрации флюида при течении с высокими скоростями.

Основные эффекты взаимодействия флюидов.

Коэффициенты парциальной проницаемости при фильтрации смеси несмешивающихся флюидов.

Потенциальная функция течения.

Уравнение фильтрации флюида при жестком режиме фильтрации.

Уравнение плано-плоского безнапорного потока флюида.

4. Феноменологическое описание фильтрации флюидов в массивах горных пород.

Фильтрационное течение при использовании совершенной скважины.

Нестационарная фильтрация флюидов.

Дебит несовершенной скважины.

Фильтрационное течение жидкости, содержащей растворенный газ.

Метод определения проницаемости массива горных пород *in-situ*.

Оценка структурных характеристик массива горных пород по результатам фильтрационных испытаний.

Оценка параметров трещины гидроразрыва.

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

учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

**6. Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Механика и термодинамика насыщенной пористой среды [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. И. Кондауров ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2007 .— 310 с.
2. Геомеханика [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. А. Спивак ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2013 .— 288 с.

#### Дополнительная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 5, Ч. 1 : Статистическая физика : учеб. пособие для ун-тов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2002, 2005, 2010 .— 616 с.
2. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 6 : Гидродинамика : учеб. пособие для вузов : рек. М-вом образования Рос. Федерации / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 5-е изд., стереотип. — 3-е изд., перераб. — М. : Физматлит, 1986, 1988, 2003, 2006 .— 736 с.

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

1. <http://lib.mipt.ru/> – электронная библиотека Физтеха
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <http://benran.ru> –библиотека по естественным наукам Российской академии наук.

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

В процессе практических занятий используются пакеты офисного программного обеспечения Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint) Matlab, Matcad.

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

Успешное освоение курса «Флюидодинамика нефтегазоносных пластов» требует большой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, семинаров, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа самостоятельных работ на семинарах, а также индивидуальных консультаций.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи и анализировать сейсмограммы.

Для формирования умения применять теоретические знания на практике студенту необходимо решать как можно больше задач.

При подготовке возможно использование следующих материалов:

1. Арнс В.Ж., Гайдин А.М. Геолого-гидрогеологические основы геотехнологических методов добычи полезных ископаемых. – М.: Недра. 1978. – 215с.
2. Бочевер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. – М.: Недра. 1969. – 368 с.
3. Марморштейн Л.М, Коллекторские и экранирующие свойства осадочных пород при различных термодинамических условиях. – Л.: Недра. 1975. – 159 с.

4. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Наука. 1977. – 664 с.
5. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды.. – М.: Гостоптехиздат. 1960. – 249 с.
6. Spanos T.J.T. The thermophysics of porous media. Chapman & Hall CRC. 2001.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. I,II. М.: Наука. 1987.
8. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука. 1967.
9. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: ФМЛ. 1959.
10. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука. 1984.
11. Спивак А.А., Массоперенос в массивах горных пород. М.: ООО "Азбука - 2000", 20007.
12. Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И., Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: ВНИИГеосистем. 2003.
13. Улькин Д.А. Методы моделирования образования и развития трещин в горных породах. Кандидатская дисс. Москва, ИПМ им. М.В. Кельдыша. 2011.
14. В.В.Адушкин, А.А.Спивак. Подземные взрывы. М.: Наука, 2007. 562 с.
15. Кузнецов В. М. Математические модели взрывного дела. – Новосибирск, 1977.
16. Каракин А.В., Курьянов Ю.А., Павленкова Н.И. Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки. М.: ВНИИГеосистем. 2003. 220 с.
17. Улькин Д.А. Методы моделирования образования и развития трещин в горных породах. Кандидатская дисс. Москва, ИПМ им. М.В. Келдыша. 2011.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика  |
| <b>профиль подготовки:</b> | Фундаментальная и прикладная физика природных систем<br>Физтех-школа Аэрокосмических Технологий<br>кафедра теоретической и экспериментальной физики геосистем |
| <b>курс:</b>               | <u>1</u>  |
| <b>квалификация:</b>       | магистр   |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** А.А. Спивак, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции  | Индикаторы достижения компетенции   |
|---|---|
| УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации  | УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения |
| ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи  | ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость   |
| 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-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов                     |
| 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-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию   | ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива   |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Флюидодинамика нефтегазоносных пластов » обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные законы геофизики, основные свойства и закономерности фильтрационных течений подземных флюидов, модели проницаемых сред, основные законы фильтрации и условия их выполнения;
- порядки численных величин, характеризующих движение флюидов в проницаемых средах;
- современные проблемы подземной флюидодинамики.

### уметь:

- пользоваться полученными знаниями для определения основных параметров, характеризующих движение газа и жидкости в проницаемых массивах горных пород;
- уметь правильно сопоставлять результаты теоретических расчетов с результатами инструментальных наблюдений;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в задачах подземной гидравлики физическое содержание;
- осваивать новые области подземной гидравлики и анализировать натурные данные;
- оценивать достоверность и точность получаемых результатов.

### владеть:



- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования сейсмологических задач;
- навыками грамотной обработки натурных данных и сопоставления их с теоретическими результатами;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач подземной гидравлики.

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

### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Флюидодинамика нефтегазоносных пластов» проводится в форме дифференцированного зачета в 9 семестре.

Текущий контроль осуществляется в форме контрольных/самостоятельных работ в письменной форме по каждой теме. Каждое задание в контрольных самостоятельных работах оценивается определенным количеством баллов (максимальное возможное значение балла указано в конце условия каждого задания). По итогам набранных баллов выставляется оценка.

**Контрольная работа №1 по теме:** Свойства флюидов в проницаемом пространстве горных пород.

1. Оценить величину сил поверхностного натяжения при течении в цилиндрических капиллярах заданного размера. (4)
2. Оценить изменение прочности горной породы на сдвиг при заданной величине водонасыщенности. (5)
3. Оценить толщину слоя пленочного флюида. (5)
4. Определить объемную скорость потока флюида через капилляр для случая молекулярного течения. (5)

**Контрольная работа №2 по теме:** Модели проницаемой среды

1. Определить пористость проницаемой среды для случая капиллярного и трещинного представления. (4)
2. Вывести уравнение связи между объемной пористостью проницаемой среды и ее просветностью. (5)
3. Определить дисперсию распределения проницаемых каналов среды по размеру для заданных параметров. (5)
4. Определить пористость среды, представленной комбинацией трещин и цилиндрических капилляров. (5)

**Контрольная работа №3 по теме:** Законы фильтрации флюидов

1. Вывести уравнение движения флюида в канале круглого сечения. (4)
2. Вывести уравнение линейно фильтрации на основе представлений подобия и размерностей. (5)
3. Определить связь между коэффициентами фильтрации и проницаемости среды. (5)
4. Определить коэффициент проницаемости жидкой фракции при фильтрации несмешивающихся жидкости для заданной концентрации одной из компонент. (5)

**Контрольная работа №4 по теме:** Феноменологическое описание фильтрации флюидов в массивах горных пород

1. Определить дебит совершенной скважины при заданных параметрах. (4)
2. Вывести уравнение для определения расхода газообразного рабочего тела при его фильтрации через цилиндрический канал. (5)
3. Нарисовать график изменения расхода воздуха при его нагнетании в цилиндрическую скважину. (5)
4. Определить трещиноватость и характерный размер проницаемого канала при заданных параметрах фильтрационного течения. (5)

### Примеры экзаменационных билетов:

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

1. Основные структурные характеристики горных пород в массиве.
2. Потенциальная функция фильтрационного течения.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

1. Уравнение Дарси в линейной форме, условия его применимости.
2. Фильтрация несмешивающихся флюидов.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

1. Модели проницаемых сред.
2. Распределение проницаемых каналов по размеру.

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

1. Взаимодействие флюида с поверхностью проницаемых каналов.
2. Дебит совершенной скважины (вывод формулы).

#### ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

1. Метод определения проницаемости массива горных пород *in-situ*.
2. Оценка трещиноватости и раскрытия трещи по результатам фильтрационных испытаний.

### 4. Критерии оценивания:

#### Контрольная работа №1 - 4:

| Оценка                  | Набранные баллы |
|-------------------------|-----------------|
| отлично (10)            | 19              |
| отлично (9)             | 17              |
| отлично (8)             | 16              |
| хорошо (7)              | 15              |
| хорошо (6)              | 14              |
| хорошо (5)              | 13              |
| удовлетворительно (4)   | 12              |
| удовлетворительно (3)   | 10              |
| неудовлетворительно (2) | 8               |
| неудовлетворительно (1) | не более 6      |

оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ;

оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;

*оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему систематизированные, знания учебной программы дисциплины при ответе экзаменационного билета и ответе на вопросы по программе дисциплины, а также по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов;*

*оценка «хорошо (7)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он твердо знает материал экзаменационного билета, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;*

*оценка «хорошо (6)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе много неточностей;*

*оценка «хорошо (5)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, если он знает материал экзаменационного билета, излагает его, умеет применять полученные знания на практике, не допускает в ответе грубых ошибок;*

*оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал фрагментарный, характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения;*

*оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета он показал разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушение логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;*

*оценка «неудовлетворительно (2-1)» выставляется студенту по результатам контрольных, самостоятельных работ и тестов, а также, если во время ответа экзаменационного билета, он показал, что не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач.*

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

Порядок проведения контрольных работ:

Во время проведения контрольных работ обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, калькуляторами.

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на дифференцированном зачете не должен превышать двух астрономических часов.

Во время проведения дифференцированного зачета при подготовке ответов на билеты, обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, конспектами лекций, семинаров и любой другой литературой.

Во время проведения дифференцированного зачета при ответе обучающегося на вопросы по билету или по программе дисциплины, он не может пользоваться конспектами лекций и семинаров и любой другой литературой.