

**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>	Механика и термодинамика пористой среды
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Фундаментальная и прикладная физика природных систем Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Зачет  
2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

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

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 4

Программу составил: О.Я. Извеков, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании центра образовательных программ ФАКТ 02.12.2024

## Аннотация

Годовой курс, читается на первом курсе магистратуры "Фундаментальная и прикладная геофизика". Курс посвящен изучению фундаментальных основ механики и термодинамики пористой среды. Объектом изучения в курсе является пористая среда с упругим скелетом, насыщенная одним или двумя флюидами, в приближении сплошной среды. Рассматриваются разделы: фильтрация одного сжимаемого флюида в однородной среде с деформируемым скелетом, совместная фильтрация двух сжимаемых флюидов в однородной среде с деформируемым скелетом, фильтрация одного сжимаемого флюида в среде с деформируемым скелетом в приближении двойной пористости. Особенностью курса является использование конечных деформаций и бескоординатного тензорного формализма. Подробно рассматриваются законы сохранения и второе начало термодинамики в механике сплошной среды. Центральное место в курсе занимает теория определяющих соотношений Трусделла. Все линейные определяющие соотношения получены линеаризацией общих выражений, согласованных с вторым началом термодинамики.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- формирование базовых знаний по механике и термодинамике пористых сред для использования в областях и дисциплинах естественнонаучного профиля, таких как нефтяной инжиниринг, строительная механика.

### Задачи дисциплины

- дать студентам базовые знания в области механики и термодинамики пористых насыщенных сред;
- дать студентам основы теории определяющих (реологических) уравнений;
- на примерах из нефтяного инжиниринга показать связь инженерных моделей с общей теорией.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	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-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

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической механики и термодинамики сплошных и пористых насыщенных сред;
- порядки численных величин, характерные для механики твердого деформируемого тела, жидкости и газа, пористых насыщенных сред.

уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики.

владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

#### 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	8			4
2	Кинематика	7			3
3	Законы баланса массы, импульса, момента импульса, энергии для пористой среды, насыщенной одним флюидом	6			5
4	Второе начало термодинамики. Определяющие соотношения пористой среды, насыщенной одним флюидом	9			3
5	Квазистатические задачи фильтрации в пористой среде с упругим скелетом	4			10
6	Распространение упругих волн в пористой среде, насыщенной одним флюидом	8			5
7	Определяющие соотношения частично насыщенных пористых сред	6			5
8	Квазистатические задачи совместной фильтрации двух флюидов в пористой среде с упругим скелетом	4			5
9	Модели многофазного вытеснения с учетом капиллярной неравновесности	8			5
Итого часов		60			45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

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

Семестр: 1 (Осенний)

###### 1. Введение

Геологическое строение нефтяного месторождения. Структурно-неоднородные среды. Насыщенные пористые материалы. Основы технологии нефтедобычи. Бурение, «заканчивание» скважины, добыча, поддержание пластового давления, стимуляция. Многоконтинуальное описание. Гипотеза суперпозиции континуумов. Силы взаимодействия и обмен энергией между континуумами. Основы тензорного исчисления в компонентном и бескоординатном изложении.

## 2. Кинематика

Законы движения континуумов. Лагранжево и эйлерово описание движения. Локальные характеристики движения – скорости, градиенты деформаций. Тензорные меры деформаций. Материальная производная относительно скелета и флюида. Уравнения совместности деформаций и скоростей. Тензор скорости деформации. Приближение малых деформаций.

## 3. Законы баланса массы, импульса, момента импульса, энергии для пористой среды, насыщенной одним флюидом

Эффективная и истинная плотность массы компоненты пористой среды. Законы сохранения (изменения) массы компоненты пористой среды. Вектор и тензор полных напряжений. Парциальный тензор напряжений. Нормальные и касательные (сдвиговые) напряжения. Постулат Коши. Фундаментальная лемма и фундаментальная теорема Коши. Объемные силы взаимодействия континуумов. Уравнение локального баланса импульса (уравнение движения) полных и парциальных напряжений. Уравнения равновесия. Уравнение локального баланса момента импульса. Полярные и неполярные среды. Симметричность тензора напряжений. Абсолютная температура. Внутренняя и кинетическая энергия компонент пористой среды. Работа поверхностных и объемных сил. Теорема для кинетической энергии. Поверхностный и объемный приток тепла. Постулат Фурье. Фундаментальная лемма и фундаментальная теорема Фурье. Вектор теплового потока. Уравнение локального баланса тепловой и механической энергии. Свободная энергия. Уравнения локального баланса энергии пористой среды, записанные с помощью различных термодинамических потенциалов. Уравнение теплопроводности.

## 4. Второе начало термодинамики. Определяющие соотношения пористой среды, насыщенной одним флюидом

Второе начало термодинамики. Основы теории определяющих соотношений.

Полная и парциальная энтропия пористого тела. Неравенство Клаузиуса - Дюгема. Внутренняя (механическая) и тепловая диссипация. Неравенства Планка и Фурье. Роль второго начала термодинамики как средства отбора допустимых определяющих уравнений. Состояние и реакция материального элемента. Определяющие (реологические) уравнения. Принципы детерминизма, локального действия, материальной независимости от выбора системы отсчета. Принцип термодинамической согласованности. Правило равноприсутствия. Материальная симметрия. Память материала.

Необходимое и достаточное условие выполнения второго начала термодинамики (связь плотности свободной энергии с тензорами напряжений и плотностями энтропии). Коэффициенты и тензоры теплопроводности и проницаемости. Неотрицательная определенность тензоров теплопроводности и проницаемости. Внутренняя диссипация термоупругого насыщенного пористого материала. Линейная модель термоупругой насыщенной пористой среды с малыми деформациями, малыми изменениями температуры и вязким взаимодействием компонент. Закон Дарси. Тензор эффективных напряжений. Отклонения закона фильтрации от закона Дарси: причины и проявления.

## Семестр: 2 (Весенний)

## 5. Квазистатические задачи фильтрации в пористой среде с упругим скелетом

Уравнения равновесия и пьезопроводности. Инжекция жидкости в деформируемый пористый материал. Консолидация пористого слоя. Нелинейная седиментация.

## 6. Распространение упругих волн в пористой среде, насыщенной одним флюидом

Понятие слабого разрыва. Соотношения совместности на слабом разрыве. Волны ускорений. Акустический тензор. Типы и скорости упругих волн в насыщенной пористой среде. Волны Био.

## 7. Определяющие соотношения частично насыщенных пористых сред

Объемные доли флюидов и насыщенность. Баланс массы и импульса. Капиллярное давление. Кривая капиллярного давления. Особенности термодинамики частично насыщенных пористых сред. Закон сохранения энергии. Второе начало термодинамики. Следствия из неравенства диссипации для частично насыщенных пористых сред с упругим скелетом. Линейная модель для частично насыщенных пористых сред с упругим скелетом. Закон Дарси для частично насыщенных пористых сред. Относительные фазовые проницаемости.

## 8. Квазистатические задачи совместной фильтрации двух флюидов в пористой среде с упругим скелетом

Поршневое вытеснение. Устойчивость границы раздела флюидов в модели поршневого вытеснения. Модель Баклея – Леверетта. Метод характеристик, формирование скачков насыщенности. Задача о вытеснении в одномерной постановке. Модель Маскета – Леверетта. Задача о равновесном вытеснении в одномерной постановке с учетом капиллярных эффектов. Капиллярный гистерезис.

## 9. Модели многофазного вытеснения с учетом капиллярной неравновесности

Модели многофазного вытеснения с учетом капиллярной неравновесности.

Перекрестные члены в законе Дарси. Характерное время установления капиллярного равновесия. Динамический и квазистатический капиллярный гистерезис. Классические модели капиллярной неравновесности. Модель Баренблатта. Термодинамически согласованная модель капиллярной неравновесности с внутренним параметром. Кинетическое уравнение для внутреннего параметра. Задача о динамическом гистерезисе в линейном приближении.

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

Необходимое оборудование для лекций: аудитория, компьютер и мультимедийное оборудование (проектор, интерактивная доска).

## 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.

### Дополнительная литература

1. Бескоординатное тензорное исчисление для механики сплошных сред [Текст] : учеб. пособие для студентов вузов по направ. "Прикладная математика и физика" / Е. И. Рыжак ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2011 .— 170 с.
2. Применение SIMULIA/Abaqus при изучении курса механики твердого деформируемого тела: реологические модели [Текст] : учеб. пособие для вузов / О. Я. Извеков, Д. В. Корнев ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2014 .— 146 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. Необходимое программное обеспечение: MS Word, MS Power Point.

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

Успешное освоение курса «Механика и термодинамика пористой среды» 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 литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях;
- подготовку к зачету и экзамену.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Фундаментальная и прикладная физика природных систем Физтех-школа Аэрокосмических Технологий центр образовательных программ ФАКТ
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** О.Я. Извеков, канд. физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	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-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

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Механика и термодинамика пористой среды» обучающийся должен:

### знать:

- фундаментальные понятия, законы, теории классической механики и термодинамики сплошных и пористых насыщенных сред;
- порядки численных величин, характерные для механики твердого деформируемого тела, жидкости и газа, пористых насыщенных сред.

### уметь:

- пользоваться своими знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач;
- производить численные оценки по порядку величины;
- видеть в технических задачах физическое содержание;
- осваивать новые предметные области, теоретические подходы и экспериментальные методики.

### владеть:

- навыками освоения большого объема информации;
- навыками самостоятельной работы;
- культурой постановки и моделирования физических задач;
- практикой исследования и решения теоретических и прикладных задач.

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

Текущий контроль заключается в учете посещения студентами занятий, а также в учете тех или иных видов активности студентов на занятиях: выполнения контрольных работ, решения задач, обсуждения возникающих вопросов по текущему материалу и т.п. Данные по текущему контролю учитываются при выставлении оценок на экзамене.



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

Аттестация по дисциплине «Механика и термодинамика пористых сред» проводится в форме зачёта в 9 семестре и экзамена в 10 семестре.

Текущий контроль заключается в учете посещения студентами занятий, а также в учете тех или иных видов активности студентов на занятиях: выполнения контрольных работ, решения задач, обсуждения возникающих вопросов по текущему материалу и т.п. Данные по текущему контролю учитываются при выставлении оценок на экзамене.

#### **Список вопросов:**

1. Гипотеза суперпозиции континуумов.
2. Лагранжево и эйлерово описание движения сплошных сред. Тензорные меры деформации. Материальная производная относительно скелета и флюида. Уравнение совместности деформаций и скоростей. Тензор скорости деформации. Приближение малых деформаций, тензор малых деформаций. Геометрический смысл компонент тензора малых деформаций.
3. Эффективная и истинная плотность массы компоненты пористой среды. Законы сохранения (изменения) массы компоненты пористой среды. Вектор и тензор полных напряжений, фундаментальная теорема Коши. Парциальный тензор напряжений. Объемные силы взаимодействия континуумов. Уравнение локального баланса импульса (уравнение движения) для флюида и скелета. Симметричность тензора напряжений. Уравнение локального баланса тепловой и механической энергии. Свободная энергия.
4. Неравенство Клаузиуса - Дюгема. Роль второго начала термодинамики как средства отбора допустимых определяющих уравнений.
5. Состояние и реакция материального элемента. Принципы детерминизма, локального действия, материальной независимости от выбора системы отсчета. Принцип термодинамической согласованности. Правило равноприсутствия. Материальная симметрия. Определение жидкости, изотропного твердого тела, анизотропного твердого тела с помощью групп симметрии. Память материала.
6. Вывод определяющих уравнений для идеального газа.
7. Вывод определяющих соотношений для изотропного твердого тела.
8. Линейная модель термоупругой насыщенной пористой среды с малыми деформациями, малыми изменениями температуры и вязким взаимодействием компонент. Закон Дарси.
9. Задача об инъекции сжимаемой жидкости в пористый материал с недеформируемым скелетом. Учет деформируемости скелета.
10. Задача о консолидации пористого слоя.

#### **Примеры билетов, используемых на экзамене.**

##### **БИЛЕТ № 1**

1. Уравнение совместности деформаций и скоростей. Совместность малой деформации (малого поворота) и градиента скорости.
2. Квазистатический и динамический капиллярный гистерезис. Задача о динамическом гистерезисе в рамках линейной модели капиллярной неравновесности с внутренним параметром.

### БИЛЕТ № 2

1. Законы сохранения масс в лагранжевой и эйлеровой форме для пористой среды, насыщенной одним флюидом. Уравнение неразрывности в случае, когда флюид несжимаемый, а скелет деформируемый.
2. Метод внутренних переменных. Модель капиллярной неравновесности. Кинетическое уравнение для внутреннего параметра, характеризующего распределение флюидов в поровом пространстве при постоянной насыщенности.

### БИЛЕТ № 3

1. Уравнения движения континуумов, составляющих насыщенную пористую среду. Лемма о разложении сил взаимодействия на равновесную и диссипативную часть.
2. Модель Баклея – Леверетта вытеснения нефти водой. Функция Баклея. Соотношения на характеристиках. Сильный разрыв насыщенности.

### БИЛЕТ № 4

1. Вектор и тензор напряжений. Уравнение равновесия для тензора полного напряжения.
2. Поршневая модель вытеснения нефти водой. Устойчивость поршневого вытеснения.

### БИЛЕТ № 5

1. Закон сохранения энергии в однотемпературном приближении. Приведенная форма уравнения локального баланса внутренней энергии.
2. Линейная модель среды, упругий скелет которой насыщен двумя слабо сжимаемыми флюидами.

### БИЛЕТ № 6

1. Интегральное и дифференциальное неравенство энтропии. Значение неравенства энтропии в механике сплошных сред
2. Определяющие уравнения термоупругой пористой среды с двумя флюидами. Относительные фазовые проницаемости. Капиллярное давление. Обобщенный закон Дарси.

### БИЛЕТ № 7

1. Принцип термодинамической согласованности. Его модификация для несжимаемой жидкости, насыщающей недеформируемый скелет.
2. Кинематика и законы сохранения для термоупругого пористого материала, насыщенного двумя несмешивающимися флюидами.

### БИЛЕТ № 8

1. Определяющие уравнения термоупругой пористой среды с начально-изотропным скелетом. Общий случай.
2. Распространение волн в линейно-упругой пористой среде.

### БИЛЕТ № 9

1. Линейная модель насыщенной термоупругой среды.
2. Материальная симметрия, жидкость, твердое тело. Анизотропия

### Примеры задач для контрольных работ.

#### Контрольная работа 1:

1) Показать, что  $\rho = \rho_k \{1 - 2I_1(\mathbf{E}) + 4I_2(\mathbf{E}) - 8I_3(\mathbf{E})\}^{1/2}$ , где  $I_k(\mathbf{E})$ ,  $k = 1, 2, 3$  - главные инварианты тензора конечных деформаций Альманзи, определенные формулами

$$I_1(\mathbf{E}) = \mathbf{E} : \mathbf{I}, \quad I_2(\mathbf{E}) = \frac{1}{2} \{(\mathbf{E} : \mathbf{I})^2 - \mathbf{E}^2 : \mathbf{I}\}, \quad I_3(\mathbf{E}) = \det \mathbf{E}$$

Указание: для упрощения выкладок перейти в главные оси.

2) Показать, что уравнение локального баланса массы скелета в форме Лагранжа при бесконечно малых деформациях имеет вид

$$r_s = r_{k_s} (1 - I_1(\mathbf{e})), \quad I_1(\mathbf{e}) = \mathbf{e} : \mathbf{I}$$

где  $\mathbf{e}$  - симметричный тензор малых деформаций.

3) Вычислить производные девиатора по тензору, инвариантов по тензору, детерминанта по тензору.

#### Контрольная работа 2:

1) Вывести определяющие соотношения для идеального теплопроводящего газа

$$\psi = \psi(\rho, \theta), \quad p = \rho^2 \frac{\partial \psi(\rho, \theta)}{\partial \rho}, \quad \eta = -\frac{\partial \psi(\rho, \theta)}{\partial \theta}, \quad \mathbf{q}(\rho, \theta, \nabla \theta) \cdot \nabla \theta \geq 0$$

где  $\rho, \theta$  - плотность массы и абсолютная температура,  $\psi(\rho, \theta)$  - удельная свободная энергия,  $p$  - давление,  $\eta$  - удельная энтропия,  $\mathbf{q}$  - вектор теплового потока

2) Является ли изотропным материал, в котором тензор напряжений

$$\mathbf{T}(\mathbf{E}) = \beta_0(I_k) \mathbf{I} + \beta_1(I_k) \mathbf{E} + \beta_2(I_k) \mathbf{E}^2$$

где  $\beta_i(I_k)$  - функции инвариантов

$$I_1(\mathbf{E}) = \mathbf{E} : \mathbf{I}, \quad I_2(\mathbf{E}) = \frac{1}{2} \{(\mathbf{E} : \mathbf{I})^2 - \mathbf{E}^2 : \mathbf{I}\}, \quad I_3(\mathbf{E}) = \det \mathbf{E}$$

тензора деформаций Альманзи  $\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{I} - \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G})$ .

Определение:  $\mathbf{T}^+$  - изотропная функция  $\mathbf{U}$ , т.ч.  $\mathbf{T}^+(\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} \cdot \mathbf{K}^T) = \mathbf{K} \cdot \mathbf{T}^+(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{K}^T$  для всех ортогональных тензоров  $\mathbf{K}$ .

3) Какие из определяющих соотношений не удовлетворяют принципу материальной независимости от системы отсчета

а)  $\mathbf{T} = \lambda(\mathbf{E} : \mathbf{I}) \mathbf{I} + 2\mu \mathbf{E}$ ,  $\lambda, \mu = \text{const}$ ,  $\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{I} - \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{G})$  - тензор деформаций Альманзи;

б)  $\mathbf{T}_k = a(\mathbf{E}_k : \mathbf{I}) \mathbf{I} + b \mathbf{E}$ ,  $a, b = \text{const}$

где  $\mathbf{E}_k = \frac{1}{2}(\mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{G}^{-1T} - \mathbf{I})$  - тензор деформаций Коши-Грина,  $\mathbf{T}_k = \mathbf{J} \mathbf{T} \cdot \mathbf{F}^{-1T}$ ,  $\mathbf{T}_k \neq \mathbf{T}_k^T$  - несимметричный тензор напряжений Пиолы-Кирхгофа 1 рода.

в)  $\mathbf{T}_k = m(\mathbf{E} : \mathbf{I}) \mathbf{G}^{-1} + n(\mathbf{G}^{-1} - \mathbf{G}^T)$ ,  $m, n = \text{const}$

г)  $\mathbf{T} = -p(\rho) \mathbf{I} + \mu(\nabla \otimes \mathbf{v} + \nabla \otimes \mathbf{v}^T)$ ,  $\lambda, \mu = \text{const}$

#### Контрольная работа 3:

- 1) Записать локальный закон сохранения энергии для случая чистой теплопроводности, когда  $u = u(\theta)$ , градиент деформации  $\mathbf{G}$  – ортогональный тензор,  $\mathbf{q} = \kappa \nabla \theta$  – вектор теплового потока.
- 2) Радиально-симметричная задача о нестационарной фильтрации сжимаемой жидкости из пласта с недеформируемым скелетом в круглую скважину. Задано начальное поровое давление. В начальный момент времени начинается отбор флюида с постоянным дебитом. Найти зависимость давления в пласте от времени и радиальной координаты.
- 3) Найти скорость плоского фронта поршневого вытеснения при постоянном перепаде давлений на границах слоя. (Одномерная задача).

#### Контрольная работа 4:

- 1) Показать, что внутренняя диссипация  $\delta_m$  в термоупругой пористой среде совпадает с диссипацией фильтрации  $\delta_f$ .
- 2) Пусть  $\mathbf{G}(\mathbf{x}, t)$  – заданный гладкий градиент деформации сплошного термоупругого материала, теплопроводность и тепловые источники в котором пренебрежимо малы. Показать, что
  - а) рассматриваемый процесс является изоэнтропическим;
  - б) температура  $\theta(\mathbf{x}, t)$  термоупругого материала с произвольным типом симметрии определяется выражением

$$\rho \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} \dot{\theta} = - \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \theta} : \mathbf{D}, \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{G}}^{-1} \cdot \mathbf{G} + \mathbf{G}^T \cdot \dot{\mathbf{G}}^{-1T}) = \frac{1}{2} (\nabla \otimes \mathbf{v} + (\nabla \otimes \mathbf{v})^T)$$

#### 4. Критерии оценивания

##### Зачтено

Оценка «зачтено» выставляется студенту если в процессе устного собеседования он уверенно справляется с предложенными вопросами из «Списка вопросов для оценки знаний на промежуточном зачете в 1 семестре».

Оценка «не зачтено» выставляется студенту если в процессе устного собеседования показано, что он 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.

##### Экзамен

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 и тестов;

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 зачета:**

В процессе сдачи зачета в 9 семестре студенту предлагается ответить на 2-3 вопроса. Студент получает оценку «зачтено», если в процессе устного собеседования уверенно справляется с предложенными вопросами.

Во время проведения экзамена при подготовке ответа на билет, допускается использование конспектов лекций и любой другой литературой. Во время ответа использование литературы не допускается. Задача экзаменуемому выдается после успешного ответа на вопрос билета. При решении задачи использование литературы не допускается.