

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Механико-математический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан

Л. В. Гензе

Рабочая программа дисциплины

**Механика реологически сложных сред**

по направлению подготовки

**01.04.03 Механика и математическое моделирование**

Направленность (профиль) подготовки :

**Механика жидкости, газа и нефтегазотранспортных систем**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Магистр**

Год приема

**2024, 2025**

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

А.М. Бубенников

Председатель УМК

Е.А. Тарасов

Томск – 2024

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-1 Способен самостоятельно решать исследовательские задачи в рамках реализации научного (научно-технического, инновационного) проекта.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК 1.1 Проводит исследования, направленные на решение отдельных исследовательских задач

ИПК 1.2 Определяет способы практического использования научных (научно-технических) результатов

ИПК 1.3 Осуществляет наставничество в процессе проведения исследований

## **2. Задачи освоения дисциплины**

Приобретение знаний о принципах построения математических моделей физико-механических явлений и процессов. Приобретение знаний о замкнутых математических постановках задач механики реологически сложных сред и методах их анализа и решения.

2. Формирование умений анализировать сделанную математическую постановку, линеаризовать поставленную нелинейную задачу механики реологически сложных сред для ее предварительного исследования.

3. Развитие навыков математической постановки и решения задач различных разделов механики реологически сложных сред, навыков использования практических приемов и методов решения задач классических разделов механики реологически сложных сред.

## **3. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплина (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Второй семестр, экзамен

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Аэротермохимия.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 з.е., 216 часов, из которых:

-лекции: 32 ч.

-практические занятия: 32 ч.

в том числе практическая подготовка: 0 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины, структурированное по темам**

**Тема 1.** Основы теории определяющих соотношений. Модели реологически сложных сред. Законы реологии. Классификация реологических свойств.

**Тема 2.** Неньютоновское сдвиговое течение. Модели аномально-вязких и вязкопластических сред. Течение неньютоновских жидкостей в трубах и каналах.

**Тема 3.** Структурные явления при сдвиговом течении. Явления тиксотропии реопектичности.

**Тема 4.** Нелинейные свойства твердых тел Упругость при сдвиговом течении. Модель Холломона. Деформация нелинейно-упругих сред.

**Тема 5.** Нелинейная пластичность. Деформация твердых тел с нелинейным упрочнением.

**Тема 6.** Вязкоупругость. Релаксация и ползучесть. Теории старения. Нелинейные эффекты в вязкоупругости.

## **9. Текущий контроль по дисциплине**

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

## **10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации**

Экзамен во втором семестре проводится в письменной форме по билетам. Экзаменационный билет состоит из двух частей. Продолжительность экзамена 1,5 часа.

*Структура экзамена должна соответствовать компетентностной структуре дисциплине. При описании системы оценивания итогового контроля по дисциплине необходимо продемонстрировать достижение всех запланированных индикаторов – результатов обучения.*

*Например,*

Первая часть представляет собой тест из 5 вопросов, проверяющих ИУК-1.1. Ответы на вопросы первой части даются путем выбора из списка предложенных.

1. Среда у которой эффективная вязкость уменьшается с ростом скорости деформации называется:
  - a. ньютоновской,
  - b. вязкопластической,
  - c. дилатантной,
  - d. псевдопластической
2. Реологические модели устанавливают связь между:
  - a. температурой и деформацией,
  - b. температурой и напряжением,
  - c. напряжениями и деформациями или скоростями деформаций,
  - d. температурой и скоростью деформаций.
3. К вязким ньютоновским жидкостям относятся среды вязкость которых
  - a. не зависит от скорости деформаций,
  - b. увеличивается с ростом скоростей деформации,
  - c. уменьшается с ростом скоростей деформаций,
  - d. зависит от деформации сдвига.
4. Среда, которые при деформации проявляют свойства, как твердых тел, так и жидкостей называются:
  - a. псевдопластическими,
  - b. дилатантными,

- с. вязкоупругими,
  - д. вязкопластическими.
- 5. При каких условиях способны течь ньютоновские жидкости
  - а. под действием самых малых внешних нагрузок;
  - б. под действием самых больших внешних нагрузок;
  - с. под действием самой высокой температуры;
  - д. под действием самой низкой температуры.
- 6. Вязкие свойства тела можно представить с помощью идеальной модели:
  - а. Гука
  - б. Ньютона
  - с. Сен-Венана-Кулона
  - д. Эйлера - Паскаля
- 7. Свойства тензора деформаций.
  - а. Тензор деформаций является симметричным
  - б. Тензор деформаций является кососимметричным
  - с. Тензор деформаций является диагональным
  - д. Тензор деформаций является сферическим
- 8. Какой вид имеют соотношения Коши.
  - а.  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$
  - б.  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$
  - с.  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right)$
  - д.  $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right)$
- 9. Что связывают соотношения Коши.
  - а. Деформации и напряжения
  - б. Деформации и скорость деформации
  - с. Напряжения и скорость напряжения
  - д. Деформации и перемещения
- 10. Точка зрения Лагранжа на изучение движения сплошной среды заключается в исследовании изменения величин (например, скорости, температуры, плотности), описывающих движение и состояние для
  - а. каждой точки пространства
  - б. каждой точки среды
- 11. Точка зрения Эйлера на изучение движения сплошной среды заключается в исследовании изменения величин (например, скорости, температуры, плотности), описывающих движение и состояние для ...
  - а. каждой точки пространства
  - б. каждой точки среды
- 12. Лагранжевы координаты движущейся сплошной среды с течением времени ...

- a. изменяются
  - b. не изменяются
13. Эйлера координаты движущейся сплошной среды с течением времени ...
- a. изменяются
  - b. не изменяются
14. Подходы к описанию движения сплошной среды с позиций Эйлера и Лагранжа ...
- a. эквивалентны
  - b. неэквивалентны
  - c. тождественны.
15. Если при движении жидкости в данной точке скорость не изменяется, то такое движение называется:
- a. установившимся
  - b. неустановившимся
16. Теория вязкой ньютоновской жидкости связывает:
- a. напряжения и деформации,
  - b. напряжения и скорости деформаций,
  - c. деформации и скорости деформаций,
  - d. напряжения и завихренность.
17. Свойства тензора напряжений
- a. Тензор напряжений является симметричным
  - b. Тензор напряжений является кососимметричным
  - c. Тензор напряжений является диагональным
  - d. Тензор напряжений является сферическим
18. Какие напряжения равны нулю на главных площадках
- a. Нормальные
  - b. Касательные
  - c. Нормальные и касательные
  - d. На главных площадках напряжения отличны от нуля.
19. Что характеризует шаровая часть тензора напряжений.
- a. Всестороннее равномерное сжатие
  - b. Одноосное растяжение
  - c. Кручение
  - d. Сдвиг
20. Что характеризует девиатор напряжений.
- a. Всестороннее равномерное сжатие
  - b. Одноосное растяжение
  - c. Кручение
  - d. Сдвиг
21. Что характеризует шаровая часть тензора скоростей деформаций.
- a. Всестороннее равномерное сжатие
  - b. Одноосное растяжение
  - c. Кручение
  - d. Сдвиг

22. Что характеризует девиатор скоростей деформаций.

- a. Всестороннее равномерное сжатие
- b. Одноосное растяжение
- c. Кручение
- d. Сдвиг

23. Как записывается обобщенный закон Гука.

- a.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$
- b.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} + 4\gamma \varepsilon_{kj}$
- c.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \delta_{ij}$
- d.  $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + 2 \frac{\sigma_Y}{U} \varepsilon_{ij}$

24. Как записывается обобщенный закон Ньютона.

- a.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$
- b.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} + 4\gamma \varepsilon_{kj}$
- c.  $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + 2\mu \left( \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij} \right)$
- d.  $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + 2 \frac{\sigma_Y}{U} \varepsilon_{ij}$

25. Как записывается закон жесткопластического поведения материала

- a.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$
- b.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} + 4\gamma \varepsilon_{kj}$
- c.  $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + 2\mu \left( \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{kk} \delta_{ij} \right)$
- d.  $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + 2 \frac{\sigma_Y}{U} \varepsilon_{ij}$

26. Как записывается реологическая модель идеальной жидкости.

- a.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$
- b.  $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} + 4\gamma \varepsilon_{kj}$
- c.  $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij}$
- d.  $\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + 2 \frac{\sigma_Y}{U} \varepsilon_{ij}$

27. Граничные условия справедливы:

- a. Внутри тела
- b. На его границе
- c. На границе и внутри тела.

28. На какие силы разделяют силы, действующие на жидкость.

- a. Объемные и поверхностные
- b. Объемные и сосредоточенные
- c. Поверхностные и погонные
- d. Объемные и погонные

29. Идеальной жидкостью называется

- a. жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение;
- b. жидкость, подходящая для применения;

- с. жидкость, способная сжиматься;
  - d. ) жидкость, существующая только в определенных условиях.
- 30. Сжимаемость это свойство жидкости
  - a. изменять свою форму под действием давления;
  - b. изменять свой объем под действием давления;
  - с. сопротивляться воздействию давления, не изменяя свою форму;
  - d. изменять свой объем без воздействия давления
- 31. Жидкость Рейнера – Ривлина является:
  - a. невязкой,
  - b. вязкоупругой,
  - с. тензорно нелинейной,
  - d. пластической,
- 32. Модель Оствальда – де Вейля описывает течение дилатантной жидкости при значениях коэффициента нелинейности
  - a.  $0 < n < 1$
  - b.  $1 < n$
  - с.  $-1 < n < 0$
  - d.  $n < -1$
- 33. Модель Оствальда – де Вейля описывает течение псевдопластической жидкости при значениях коэффициента нелинейности
  - a.  $0 < n < 1$
  - b.  $1 < n$
  - с.  $-1 < n < 0$
  - d.  $n < -1$
- 34. При течении вязкопластических сред предельное напряжение сдвига
  - a.  $\sigma_Y = 0$ ;
  - b.  $\sigma_Y > 0$ ;
  - с.  $\sigma_Y < 0$ .
- 35. Математическая модель вязкоупругой среды Максвелла строится в предположении, что результирующая деформация в некоторой точке среды представляет собой
  - a. сумму упругой деформации и деформации течения;
  - b. сумму упругой и пластической деформации;
  - с. сумму пластической деформации и деформации течения.
- 36. Математическая модель вязкоупругой среды Кельвина – Фойгта строится в предположении, что результирующее напряжение в некоторой точке среды представляет собой
  - a. сумму упругого и вязкого напряжения;
  - b. сумму вязкого напряжения и предельного напряжения сдвига;
  - с. сумму вязкого напряжения и предельного напряжения сдвига.
- 37. Среды Балкли – Гершеля являются
  - a. Вязкопластическими;
  - b. Пластическими;
  - с. Аномально вязкими;

- d. Вязкоупругими.
38. Среды Шведова – Бингама являются
- Вязкопластическими;
  - Пластическими;
  - Аномально вязкими;
  - Вязкоупругими.
39. Как определяется объёмная деформация
- $\varepsilon_V = \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}$
  - $\varepsilon_V = \varepsilon_{kk}$
  - $\varepsilon_V = \varepsilon_{ik} \varepsilon_{kj}$
  - $\varepsilon_V = \varepsilon_{ij}$
40. Как определяется интенсивность сдвиговых напряжений.
- $T = \sqrt{\tau_j^i \tau_i^j / 2}$
  - $T = \sqrt{2 \tau_j^i \tau_i^j}$
  - $T = \tau_{ij} \delta_{ij}$
  - $T = \tau_{ij}$
41. Как определяется шаровая часть тензора деформаций.
- $\varepsilon_{ij}^S = \varepsilon_{ij} \delta_{ij}$
  - $\varepsilon_{ij}^S = \varepsilon_{ij}$
  - $\varepsilon_{ij}^S = \frac{1}{3} \varepsilon_{ij} \delta_{ij}$
  - $\varepsilon_{ij}^S = \frac{1}{3} \varepsilon_{ij}$
42. Как определяется девиаторная часть тензора деформаций.
- $\varepsilon_{ij}^D = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{ij} \delta_{ij}$
  - $\varepsilon_{ij}^D = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}$
  - $\varepsilon_{ij}^D = \varepsilon_{kk} - \frac{1}{3} \varepsilon_{ij} \delta_{ij}$
  - $\varepsilon_{ij}^D = \varepsilon_{kk} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}$
43. Как определяется интенсивность сдвиговых деформаций.
- $U = \sqrt{\varepsilon^{D^i}_j \varepsilon^{D^j}_i} / 2$
  - $U = \sqrt{2 \varepsilon^{D^i}_j \varepsilon^{D^j}_i}$
  - $U = \varepsilon_{ij} \delta_{ij}$
  - $U = \varepsilon_{ij}$
44. Как определяется шаровая часть тензора напряжений.
- $p = \sigma_{ij} \delta_{ij}$
  - $p = \sigma_{ij}$



$$c. \quad p = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$$

$$d. \quad p = \frac{1}{3} \sigma_{ij}$$

45. Как определяется девиаторная часть тензора напряжений

$$a. \quad \tau_{ij} = \sigma_{ij} - p \delta_{ij}$$

$$b. \quad \tau_{ij} = \sigma_{ij} + p \delta_{ij}$$

$$c. \quad \tau_{ij} = \sigma_{kk} - \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$$

$$d. \quad \tau_{ij} = \sigma_{kk} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$$

Вторая часть содержит один вопрос, проверяющий ИОПК-2.2. Ответ на вопрос второй части дается в развернутой форме.

1. Предмет и метод реологии. Гипотеза сплошности. Элементарный объем.
2. Координаты Эйлера и координаты Лагранжа. Скорость и ускорение точек сплошной среды. Переход от Эйлера к Лагранжу и обратно.
3. .
4. Линии тока, поверхность тока, трубка тока, траектория и струя.
5. Вектор вихря. Вихревая линия и вихревая трубка.
6. Потенциальное и вихревое течение. Циркуляция скорости. Теорема Кельвина.
7. Деформации Коши.
8. Кинематический смысл компонент тензора деформации и тензора поворота. Вектор поворота.
9. Первая теорема Гельмгольца
10. Совместность деформаций Коши.
11. Тензор скоростей деформаций. Первая теорема Гельмгольца (в скоростях)
12. Кинематический смысл компонент тензора скоростей деформаций.
13. Объемная деформация
14. Тензор силовых напряжений.
15. Уравнение баланса массы.
16. Уравнение движения сплошных сред в напряжениях.
17. Уравнение энергии.
18. Свойства тензора деформации
19. Свойства тензора напряжений.
20. Интенсивность сдвиговых напряжений.
21. Интенсивность сдвиговых деформаций.
22. Интенсивность скоростей сдвиговых деформаций.
23. Шаровая часть тензора деформаций.
24. Девиаторная часть тензора деформаций.
25. Вязкая ньютоновская жидкостью
26. Течения ньютоновской жидкости в цилиндрической трубе.
27. Течение Куэтта ньютоновской жидкости.

28. Течение в открытом канале ньютоновской жидкости
  29. Уравнения Навье – Стокса
  30. Модель жидкости Оствальда – де Вейля
  31. Модель жидкости Шведова – Бингама
  32. Модел жидкости Балкли – Гершеля
  33. Вязкоупругие среды Кельвина – Фойхта
  34. Вязкоупругие среды Максвелла
  35. Течения ньютоновской жидкости в цилиндрической трубе.
  36. Течение ньютоновской жидкости между двумя параллельными пластинами
  37. Течение Куэтта ньютоновской жидкости.
  38. Течение в открытом канале ньютоновской жидкости
  39. Течения дилатантной жидкости в цилиндрической трубе.
  40. Течение в открытом канале дилатантной жидкости
  41. Течение дилатантной жидкости между двумя параллельными пластинами
  42. Течения псевдопластической жидкости в цилиндрической трубе.
  43. Течение псевдопластической жидкости между двумя параллельными пластинами
  44. Течение в открытом канале псевдопластической жидкости
  45. Течения жидкости Шведова – Бингама в цилиндрической трубе.
  46. Течение жидкости Шведова – Бингама между двумя параллельными пластинами
  47. Течение в открытом канале жидкости Шведова – Бингама
  48. Течения жидкости Балкли – Гершеля в цилиндрической трубе.
  49. Течение жидкости Балкли – Гершеля между двумя параллельными пластинами
  50. Течение в открытом канале жидкости Балкли – Гершеля
- Система критериев при оценивании ответов на вопросы экзамена*

Оценка	Критерии соответствия
5	Дан правильный и развернутый ответ на вопрос. Студент четко и логично изложил свой ответ на поставленный в билете вопрос.
4	Дан правильный ответ на вопрос, но не все изложено развернуто и логически структурировано.
3	В целом дан правильный ответ на вопрос, но он изложен поверхностно и с нарушением логики изложения.
2	Ответ представлен очень поверхностно и с нарушением логики изложения. Студент очень плохо владеет основными моделями и концепциями механики. Допущены существенные терминологические и фактические ошибки.
1	Дан неправильный ответ, однозначно неправильная трактовка темы.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «IDo» - <https://lms.tsu.ru/course/view.php?id=9381>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

### а) основная литература:

1. . Малкин А. Я., Исаев А. И. Реология. Концепции, методы, приложения Москва: Профессия, 2007
2. Матвиенко О. В. Математические модели производственных процессов для приготовления битумных дисперсных систем / О. В. Матвиенко, Ф. Г. Унгер, В. П. Базуев ; Том. гос. архит.-строит. ун-т. – Томск : Издательство ТГАСУ, 2015. – 335
3. Тетельмин В. В. Реология нефти / В. В. Тетельмин, В. А. Язев. – Учеб. изд. – М. : Граница, 2009, 2015. – 255 с..

### б) дополнительная литература:

1. Мачихин Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 215 с.
2. Косой, В. Д. Инженерная реология биотехнологических сред / В. Д. Косой, Я. И. Виноградов, А. Д. Малышев. СПб. : ГИОРД, 2005. – 648 с.

### в) Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет.

1. «Российское образование» - федеральный портал <http://www.edu.ru/index.php>
2. Научная электронная библиотека <http://elibrary.ru/defaultx.asp?>
3. Федеральная университетская компьютерная сеть России <http://www.runnet.ru/>

## 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

## 14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

## 15. Информация о разработчиках

Профессор кафедры физической и вычислительной механики, д.ф.-м.н., ст.н.с., Матвиенко О.В.

