

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования "Пермский
государственный национальный исследовательский
университет"**

Кафедра вычислительной и экспериментальной механики

Авторы-составители: **Свистков Александр Львович**
Скачков Андрей Павлович

Рабочая программа дисциплины
ТЕРМОДИНАМИКА СПЛОШНОЙ СРЕДЫ
Код УМК 92370

Утверждено
Протокол №6
от «16» июня 2020 г.

Пермь, 2020

1. Наименование дисциплины

Термодинамика сплошной среды

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина входит в вариативную часть Блока « М.1 » образовательной программы по направлениям подготовки (специальностям):

Направление: **01.04.03** Механика и математическое моделирование
направленность Фундаментальная и прикладная механика

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

В результате освоения дисциплины **Термодинамика сплошной среды** у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

01.04.03 Механика и математическое моделирование (направленность : Фундаментальная и прикладная механика)

ОПК.2 Способен разрабатывать и применять новые методы математического моделирования в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности

Индикаторы

ОПК.2.1 Анализирует и разрабатывает математические модели для решения задач в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности

ОПК.2.2 Выбирает и применяет методы математического моделирования для решения профессиональных задач

4. Объем и содержание дисциплины

Направления подготовки	01.04.03 Механика и математическое моделирование (направленность: Фундаментальная и прикладная механика)
форма обучения	очная
№№ триместров, выделенных для изучения дисциплины	5
Объем дисциплины (з.е.)	3
Объем дисциплины (ак.час.)	108
Контактная работа с преподавателем (ак.час.), в том числе:	36
Проведение лекционных занятий	24
Проведение практических занятий, семинаров	12
Самостоятельная работа (ак.час.)	72
Формы текущего контроля	Защищаемое контрольное мероприятие (2) Итоговое контрольное мероприятие (1)
Формы промежуточной аттестации	Экзамен (5 триместр)

5. Аннотированное описание содержания разделов и тем дисциплины

Термодинамика сплошной среды. Первый триместр

Содержание дисциплины охватывает круг проблем, связанных с моделями термодинамики сплошных сред, работающими в условиях конечных деформаций и с математическим аппаратом, используемым для построения математических моделей и решения конкретных задач.

Тензорный анализ

1. Три школы тензорного исчисления. Понятие векторного пространства. Линейное отображение. Билинейное отображение. Тензорное умножение. Определение тензора с точки зрения операторной школы. Алгебраические операции с тензорами (операторная школа). Единичный тензор. Обратный тензор. Вырожденный тензор. Транспонированный тензор. Ортогональный тензор. Поворот. Симметричный тензор. Антисимметричный тензор.
2. Обратный тензор от произведения тензоров. Транспонированный тензор от произведения тензоров. Собственные векторы и собственные значения тензоров. Ось вращения тензора поворота. Инварианты тензора. Обратный тензор от транспонированного тензора. Тождество Гамильтона-Кэли. Положительный тензор. Положительно определенный тензор. Полярное разложение невырожденного тензора. Нильпотентный тензор. Проектор. Ортопроектор. Тождества, связывающие возможные варианты скалярного умножения тензора и произведения двух других тензоров.
3. Тензорный анализ (операторная школа). Тензорные функции. Производная скалярной величины по тензорному аргументу. Производная от тензорной функции по скалярному аргументу. Производная векторной функции по векторному аргументу. Отсчетная и актуальная конфигурации. Градиент вектора, дивергенция вектора и тензора в отсчетной и в актуальной конфигурациях. Производная по скаляру от обратного тензора. Производная векторной функции от другой векторной функции по векторному аргументу.

Разрешающие уравнения в тензорной форме

4. Использование тензорного исчисления в механике сплошной среды. Индифферентный тензор. Мультипликативное разложение градиента деформации. Тензор скоростей деформирования материала. Индифферентность тензора скоростей деформирования материала. Спин. Антисимметричность спина.
5. Связь между градиентами вектора и дивергенциями вектора в отсчетной и актуальной конфигурации.
6. Связь между дивергенциями тензора в отсчетной и актуальной конфигурации.
7. Материальная производная по времени от скалярной, векторной и тензорной функций в отсчетной и в актуальной конфигурациях. Связь между соответствующими производными по времени в отсчетной и актуальной конфигурациях.
8. Уравнение равновесия в осесимметричной задаче в полярных координатах.
9. Уравнение равновесия в одномерной задаче в сферических координатах.
10. Определение скорости изменения во времени кратности удлинений материала, левого и правого тензоров растяжения с помощью тензора скоростей деформации среды. Формулировка условия несжимаемости среды с помощью тензора скоростей деформирования материала.
11. Коллоквиум

Законы термодинамики

12. Использование аналитической механики для описания механического поведения системы материальных точек с наложенными стационарными связями. Уравнения Гамильтона. Фазовое пространство. Применение аналитической механики для моделирования состояния поведения молекулярных систем. Гипотеза о максимальной мере хаоса в стационарном состоянии. Понятие энтропии и температуры с точки зрения молекулярной динамики. Распределение Гиббса.
13. Примеры использования статистической механики для описания состояния систем. Растяжение свободно-сочлененной цепи. Энтропийный характер упругих свойств эластомерных материалов.

14. Первый закон термодинамики и его следствия.
15. Второй закон термодинамики. Неравенство диссипации. Невозможность создания вечных двигателей первого и второго рода.

Уравнения состояния сплошных сред

16. Несжимаемые среды. Неравенство диссипации и определяющие уравнения газа, идеальной жидкости, ньютоновской жидкости, упругого тела. Учет несжимаемости в определяющих уравнениях среды.
17. Вывод уравнения теплопроводности для газа, идеальной жидкости, ньютоновской жидкости, упругого тела, упругого тела с дополнительными параметрами состояния.
18. Гиперупругие материалы. Потенциалы свободной энергии гиперупругих несжимаемых материалов. Одноосное сжатие и эквивалентное двуосное растяжение. Потенциал Трелоара. Потенциал Муни-Ривлина. Координаты Муни-Ривлина. Потенциал Джента.
19. Задача о раздувании несжимаемой бесконечной среды, содержащей сферическую пору внутренним давлением.
20. Коллоквиум.

Модели сплошных сред

21. Разложение Ли градиента деформации пластически деформируемой среды. Следствия из разложения Ли.
22. Модель пластического течения материала в условиях конечных деформаций.
23. Модель деформируемой жидкости (расплав полимера). Сдвиговое течение расплава полимера.
24. Дифференциальные модели вязкоупругих сред.
25. Интегральные модели вязкоупругих сред.
26. Законы термодинамики смеси континуумов. Первое и второе следствие из закона сохранения энергии. Фазовое разделение в смеси континуумов.
27. Линейная термодинамика. Соотношения Онзагера. Нелокальная термодинамика.
28. Вариационная постановка задачи нахождения полей напряжений для упругого сжимаемого материала. Вариационная постановка задачи для упругого несжимаемого материала.

6. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в рабочей программе.

Основными видами учебной работы являются аудиторские занятия. Их цель - расширить базовые знания обучающихся по осваиваемой дисциплине и систему теоретических ориентиров для последующего более глубокого освоения программного материала в ходе самостоятельной работы. Обучающемуся важно помнить, что контактная работа с преподавателем эффективно помогает ему овладеть программным материалом благодаря расстановке необходимых акцентов и удержанию внимания интонационными модуляциями голоса, а также подключением аудио-визуального механизма восприятия информации.

Самостоятельная работа преследует следующие цели:

- закрепление и совершенствование теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях;
- формирование навыков подготовки текстовой составляющей информации учебного и научного назначения для размещения в различных информационных системах;
- совершенствование навыков поиска научных публикаций и образовательных ресурсов, размещенных в сети Интернет;
- самоконтроль освоения программного материала.

Обучающемуся необходимо помнить, что результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем во время проведения мероприятий текущего контроля и учитываются при промежуточной аттестации.

Обучающимся с ОВЗ и инвалидов предоставляется возможность выбора форм проведения мероприятий текущего контроля, альтернативных формам, предусмотренным рабочей программой дисциплины. Предусматривается возможность увеличения в пределах 1 академического часа времени, отводимого на выполнение контрольных мероприятий.

Процедура оценивания результатов обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

При проведении текущего контроля применяются оценочные средства, обеспечивающие передачу информации, от обучающегося к преподавателю, с учетом психофизиологических особенностей здоровья обучающихся.

7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

При самостоятельной работе обучающимся следует использовать:

- конспекты лекций;
- литературу из перечня основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля);
- текст лекций на электронных носителях;
- ресурсы информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимые для освоения дисциплины;
- лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение из перечня информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине;
- методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная:

1. Ташлыкова-Бушкевич, И. И. Физика. Часть 1. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество и магнетизм : учебник / И. И. Ташлыкова-Бушкевич. — Минск : Вышэйшая школа, 2014. — 304 с. — ISBN 978-985-06-2505-2. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. <http://www.iprbookshop.ru/35562.html>
2. Козырев, А. В. Термодинамика и молекулярная физика : учебное пособие / А. В. Козырев. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Эль Контент, 2012. — 114 с. — ISBN 978-5-4332-0029-6. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. <http://www.iprbookshop.ru/13871>

Дополнительная:

1. Дубровский, В. Г. Механика, термодинамика и молекулярная физика: сборник задач и примеры их решения : учебное пособие / В. Г. Дубровский, Г. В. Харламов. — 2-е изд. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2015. — 184 с. — ISBN 978-5-7782-2686-9. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. <http://www.iprbookshop.ru/91733>

9. Перечень ресурсов сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

<http://www.psu.ru/elektronnye-resursy-dlya-psu> Электронные ресурсы для ПГНИУ
<http://window.edu.ru/> Единое окно доступа к образовательным ресурсам

10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Образовательный процесс по дисциплине **Термодинамика сплошной среды** предполагает использование следующего программного обеспечения и информационных справочных систем:

- доступ в режиме on-line в Электронную библиотечную систему (ЭБС);
- доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.

Необходимое лицензионное и (или) свободно распространяемое программное обеспечение:

- приложение позволяющее просматривать и воспроизводить медиаконтент PDF-файлов «Adobe Acrobat Reader DC»;
- офисный пакет приложений «LibreOffice».

При освоении материала и выполнения заданий по дисциплине рекомендуется использование материалов, размещенных в Личных кабинетах обучающихся ЕТИС ПГНИУ (student.psu.ru).

При организации дистанционной работы и проведении занятий в режиме онлайн могут использоваться:

- система видеоконференцсвязи на основе платформы BigBlueButton (<https://bigbluebutton.org/>).
- система LMS Moodle (<http://e-learn.psu.ru/>), которая поддерживает возможность использования текстовых материалов и презентаций, аудио- и видеоконтент, а так же тесты, проверяемые задания, задания для совместной работы.
- система тестирования Indigo (<https://indigotech.ru/>).

11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для лекционных занятий требуется аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения практических занятий - аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для групповых (индивидуальных) консультаций - аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения текущего контроля - аудитория, оснащенная меловой (и) или маркерной доской.

Самостоятельная работа студентов: аудитория, оснащенная компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет», с обеспеченным доступом в электронную информационно-образовательную среду университета, помещения Научной библиотеки ПГНИУ.

Помещения научной библиотеки ПГНИУ для обеспечения самостоятельной работы обучающихся:

1. Научно-библиографический отдел, корп.1, ауд. 142. Оборудован 3 персональными компьютера с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.
2. Читальный зал гуманитарной литературы, корп. 2, ауд. 418. Оборудован 7 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.
3. Читальный зал естественной литературы, корп.6, ауд. 107а. Оборудован 5 персональными

компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

4. Отдел иностранной литературы, корп.2 ауд. 207. Оборудован 1 персональным компьютером с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

5. Библиотека юридического факультета, корп.9, ауд. 4. Оборудована 11 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

6. Читальный зал географического факультета, корп.8, ауд. 419. Оборудован 6 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

Все компьютеры, установленные в помещениях научной библиотеки, оснащены следующим программным обеспечением:

Операционная система ALT Linux;

Офисный пакет Libreoffice.

Справочно-правовая система «КонсультантПлюс»

**Фонды оценочных средств для аттестации по дисциплине
Термодинамика сплошной среды**

**Планируемые результаты обучения по дисциплине для формирования компетенции.
Индикаторы и критерии их оценивания**

ОПК.2

Способен разрабатывать и применять новые методы математического моделирования в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности

Индикатор	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
<p>ОПК.2.1 Анализирует и разрабатывает математические модели для решения задач в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности</p>	<p>В результате обучения студент должен знать основы тензорного анализа (операторная школа тензорного исчисления), знать основные модели термодинамики сред, работающих в условиях конечных деформаций. Студент должен уметь использовать тензорное исчисление для анализа математических моделей термодинамики нелинейных сред и вывода следствий из них, умением применять их в практических приложениях.</p>	<p align="center">Неудовлетворител</p> <p>Студент не знает основы тензорного анализа, не знает основные модели термодинамики сред, работающих в условиях конечных деформаций. Студент не умеет использовать тензорное исчисление для анализа математических моделей термодинамики нелинейных сред и не может сделать выводы следствий из них, не умеет применять их в практических приложениях.</p> <p align="center">Удовлетворительн</p> <p>Студент знает основы тензорного анализа, имеет представление об основных моделях термодинамики сред, работающих в условиях конечных деформаций.</p> <p align="center">Хорошо</p> <p>Студент знает основы тензорного анализа, имеет представление об основных моделях термодинамики сред, работающих в условиях конечных деформаций. Студент может использовать тензорное исчисление для анализа математических моделей термодинамики нелинейных сред.</p> <p align="center">Отлично</p> <p>Студент знает основы тензорного анализа, знает основные модели термодинамики сред, работающих в условиях конечных деформаций. Студент умеет использовать тензорное исчисление для анализа математических моделей термодинамики нелинейных сред и может сделать выводы следствий из них, умеет применять их в практических приложениях.</p>
<p>ОПК.2.2 Выбирает и применяет</p>	<p>В результате обучения студент должен знать основы</p>	<p align="center">Неудовлетворител</p> <p>Студент не знает основы тензорного анализа,</p>

Индикатор	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
<p>методы математического моделирования для решения профессиональных задач</p>	<p>тензорного анализа, знать начала термодинамики. Студент должен уметь проводить проверку моделей сред со сложным механическим поведением началам термодинамики, требованию объективности, и владеть методами вывода определяющих уравнений математических моделей как в отсчетной, так и в актуальной конфигурациях, умением применять их в практических приложениях.</p>	<p>Неудовлетворител не знает начала термодинамики, не умеет проводить проверку моделей сред со сложным механическим поведением, не владеет методами вывода определяющих уравнений математических моделей как в отсчетной, так и в актуальной конфигурациях, не умеет применять их в практических приложениях.</p> <p>Удовлетворительн Студент знает основы тензорного анализа, знает начала термодинамики, имеет представление о методах вывода определяющих уравнений математических моделей.</p> <p>Хорошо Студент знает основы тензорного анализа, знает начала термодинамики, умеет проводить проверку моделей сред со сложным механическим поведением, имеет представление о методах вывода определяющих уравнений математических моделей как в отсчетной, так и в актуальной конфигурациях, умеет применять их в практических приложениях.</p> <p>Отлично Студент знает основы тензорного анализа, знает начала термодинамики, умеет проводить проверку моделей сред со сложным механическим поведением, владеет методами вывода определяющих уравнений математических моделей как в отсчетной, так и в актуальной конфигурациях, умеет применять их в практических приложениях.</p>

Оценочные средства текущего контроля и промежуточной аттестации

Схема доставки : Базовая

Вид мероприятия промежуточной аттестации : Экзамен

Способ проведения мероприятия промежуточной аттестации : Оценка по дисциплине в рамках промежуточной аттестации определяется на основе баллов, набранных обучающимся на контрольных мероприятиях, проводимых в течение учебного периода.

Максимальное количество баллов : 100

Конвертация баллов в отметки

«отлично» - от 81 до 100

«хорошо» - от 61 до 80

«удовлетворительно» - от 43 до 60

«неудовлетворительно» / «незачтено» менее 43 балла

Компетенция (индикатор)	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
ОПК.2.2 Выбирает и применяет методы математического моделирования для решения профессиональных задач ОПК.2.1 Анализирует и разрабатывает математические модели для решения задач в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности	Разрешающие уравнения в тензорной форме Защищаемое контрольное мероприятие	Тензорная алгебра и тензорный анализ
ОПК.2.2 Выбирает и применяет методы математического моделирования для решения профессиональных задач ОПК.2.1 Анализирует и разрабатывает математические модели для решения задач в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности	Уравнения состояния сплошных сред Защищаемое контрольное мероприятие	Основы термодинамики сплошных сре д

Компетенция (индикатор)	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
ОПК.2.2 Выбирает и применяет методы математического моделирования для решения профессиональных задач ОПК.2.1 Анализирует и разрабатывает математические модели для решения задач в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности	Модели сплошных сред Итоговое контрольное мероприятие	Построение моделей для различных видов сплошной среды.

Спецификация мероприятий текущего контроля

Разрешающие уравнения в тензорной форме

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **13**

Показатели оценивания	Баллы
Доказать тождество тензорной алгебры	10
Доказать тождество тензорного анализа	10
Решить задачу тензорного исчисления	7
Дать определение объектам и операциям в тензорном исчислении.	3

Уравнения состояния сплошных сред

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **13**

Показатели оценивания	Баллы
Доказать часто используемое тождество при осуществлении выкладок для получения следствий в термодинамике сплошной среды.	10
Вывести следствия из начал термодинамики и требования объективности.	10
Дать математическую формулировку началам термодинамики, требованию объективности математической модели сплошной среды, физическому смыслу выводимых на их основе уравнений.	7
Дать определение тензорным величинам и понятиям, используемым в термодинамике сплошной среды.	3

Модели сплошных сред

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **40**

Проходной балл: **17**

Показатели оценивания	Баллы
Уравнения термодинамики гиперупругих сред	10
Уравнения термодинамики диссипативных сред.	10
Решение задачи по термодинамике сплошной среды.	10
Провести анализ решенной задачи по термодинамике сплошной среды.	7
Дать определение и объяснить физический смысл величин, используемых в статистической механике	3