

**Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

Направление подготовки/специальность: 14.04.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Оценочные материалы
по дисциплине
Тепловые процессы в наноструктурах**

**Москва
2024**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Разработчик

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Макаров П.Г.
	Идентификатор	R9a51899a-MakarovPG-4f257daf

П.Г. Макаров

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Макаров П.Г.
	Идентификатор	R9a51899a-MakarovPG-4f257daf

П.Г.
Макаров

Заведующий
выпускающей кафедрой

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Пузина Ю.Ю.
	Идентификатор	Re86e9a56-Puzina-4d2acad1

Ю.Ю.
Пузина

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Оценочные материалы по дисциплине предназначены для оценки достижения обучающимися запланированных результатов обучения по дисциплине, этапа формирования запланированных компетенций и уровня освоения дисциплины.

Оценочные материалы по дисциплине включают оценочные средства для проведения мероприятий текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

Формируемые у обучающегося компетенции:

1. ПК-1 Способен анализировать и моделировать физические процессы в элементах энергетического оборудования

ИД-2 Владеет навыками расчета теплогидравлических процессов в элементах энергетического оборудования, навыки постобработки результатов расчетов и компьютерного моделирования этих процессов

2. ПК-3 Готов самостоятельно определять направление и характер проводимых исследований, учитывать современные тенденции развития наноразмерных систем и устройств

ИД-2 Знает основные направления развития и современные тенденции при расчете и анализе эффективности наноразмерных систем и устройств

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации: Письменная работа

1. Кинетические методы в переносе тепла в наноструктурах (Контрольная работа)
2. Механизмы переноса тепла в наножидкостях (Контрольная работа)
3. Наноструктурированные термоэлектрические материалы (Контрольная работа)
4. Размерные эффекты и теплопереноса в одномерных, двумерных и трехмерных наноструктурах (Контрольная работа)
5. Расчет охлаждения устройств микро- и нанoeлектроники (Контрольная работа)
6. Уравнение Больцмана для фононов. Механизмы рассеяния фононов (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Разработка новых технологий на основе наножидкостей и нанокомпозитов (Коллоквиум)
2. Тепловая стабильность работы наноматериалов, нанотехнологий и наноустройств (Коллоквиум)

БРС дисциплины

2 семестр

Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:

- КМ-1 Расчет охлаждения устройств микро- и нанoeлектроники (Контрольная работа)
- КМ-2 Уравнение Больцмана для фононов. Механизмы рассеяния фононов (Контрольная работа)
- КМ-3 Кинетические методы в переносе тепла в наноструктурах (Контрольная работа)
- КМ-4 Тепловая стабильность работы наноматериалов, нанотехнологий и наноустройств

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	4	8	11	15
Введение в теплофизику микро- и наносистем					
Введение в теплофизику микро- и наносистем	+				
Методы охлаждения электронных устройств					
Методы охлаждения электронных устройств	+				
Пространственные и временные масштабы при внутреннем переносе энергии и тепла					
Пространственные и временные масштабы при внутреннем переносе энергии и тепла			+		
Микроскопические основы теплопереноса					
Микроскопические основы теплопереноса			+		
Кинетика переноса тепла в наноструктурах					
Кинетика переноса тепла в наноструктурах				+	
Теплоперенос в нанотрубках и графене					
Теплоперенос в нанотрубках					+
Теплоперенос в графене					+
Вес КМ:		10	25	30	35

3 семестр**Перечень контрольных мероприятий текущего контроля успеваемости по дисциплине:**

- КМ-5 Размерные эффекты и теплопереноса в одномерных, двумерных и трехмерных наноструктурах (Контрольная работа)
- КМ-6 Механизмы переноса тепла в наножидкостях (Контрольная работа)
- КМ-7 Наноструктурированные термоэлектрические материалы (Контрольная работа)
- КМ-8 Разработка новых технологий на основе наножидкостей и нанокомпозитов (Коллоквиум)

Вид промежуточной аттестации – Экзамен.

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-5	КМ-6	КМ-7	КМ-8
	Срок КМ:	4	8	11	15

Теплоперенос в нанокompозитах				
Теплоперенос в нанокompозитах	+			
Теплоперенос в наножидкостях				
Теплоперенос в наножидкостях	+			
Микро- и наногидродинамика				
Микро- и наногидродинамика		+		
Особенности наноструктурированных поверхностей				
Особенности наноструктурированных поверхностей		+		
Теоретические модели смачивания		+		
Управление смачиванием, растеканием. Супергидрофобность.		+		
Процессы на наноструктурированных поверхностях		+		
Теплоперенос в термоэлектрических наноматериалах				
Теплоперенос в термоэлектрических наноматериалах			+	
Флуктуации электромагнитного поля как источник теплового излучения				
Радиационный теплоперенос в наноструктурах				+
Вес КМ:	15	25	35	25

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ

I. Оценочные средства для оценки запланированных результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Индекс компетенции	Индикатор	Запланированные результаты обучения по дисциплине	Контрольная точка
ПК-1	ИД-2 _{ПК-1} Владеет навыками расчета теплогидравлических процессов в элементах энергетического оборудования, навыки постобработки результатов расчетов и компьютерного моделирования этих процессов	Знать: способы расчета процессов переноса тепла в наноматериалах и наносистемах с целью применения их на практике для разработки новых функциональных материалов Уметь: проводить тепловые расчеты в наноматериалах и нанотехнологиях	КМ-1 Расчет охлаждения устройств микро- и наноэлектроники (Контрольная работа) КМ-3 Кинетические методы в переносе тепла в наноструктурах (Контрольная работа)
ПК-3	ИД-2 _{ПК-3} Знает основные направления развития и современные тенденции при расчете и анализе эффективности наноразмерных систем и устройств	Знать: методы расчета процессов переноса тепла в системах прямого преобразования энергии с применением нанотехнологий и наноматериалов выбор параметров тепловых процессах в наносистемах и наноструктурированных материалах, особенностях	КМ-2 Уравнение Больцмана для фононов. Механизмы рассеяния фононов (Контрольная работа) КМ-4 Тепловая стабильность работы наноматериалов, нанотехнологий и наноустройств (Коллоквиум) КМ-5 Размерные эффекты и теплопереноса в одномерных, двумерных и трехмерных наноструктурах (Контрольная работа) КМ-6 Механизмы переноса тепла в наножидкостях (Контрольная работа) КМ-7 Наноструктурированные термоэлектрические материалы (Контрольная работа) КМ-8 Разработка новых технологий на основе наножидкостей и нанокомпозитов (Коллоквиум)

		размерных эффектов и теплопереноса в одномерных, двумерных и трехмерных наноструктурах механизмы переноса тепла в наножидкостях и нанокompозитах, в наноструктурированных термоэлектрических материалах Уметь: проводить тепловые расчеты в наножидкостях и нанокompозитах, в наноструктурированных термоэлектрических материалах проводить расчеты энергоэффективности типовых нанотехнологических устройств подбирать наножидкости и нанокompозиты для типовых нанотехнологических устройств	
--	--	---	--

II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

2 семестр

КМ-1. Расчет охлаждения устройств микро- и нанoeлектроники

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 10

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа.

Краткое содержание задания:

Вычислить длину свободного пробега электронов в алюминии и температуре 500 °С при комнатной температуре, исходя из теплопроводности, теплоемкости и скорости электронного газа

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: способы расчета процессов переноса тепла в наноматериалах и наносистемах с целью применения их на практике для разработки новых функциональных материалов	1.Вычислить длину свободного пробега электронов в алюминии и температуре 500 °С при комнатной температуре, исходя из теплопроводности, теплоемкости и скорости электронного газа 2.Вычислить частоты колебаний кристаллической решетки меди при волновых числах, близких к $\frac{\pi}{a}$

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-2. Уравнение Больцмана для фононов. Механизмы рассеяния фононов

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа.

Краткое содержание задания:

Вычислить среднее число фононов $10^{13} \text{сек}^{-1} \text{сек}^{-1}$ в пределе $k_B T > \hbar \omega$ при 300K и 400K

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: методы расчета процессов переноса тепла в системах прямого преобразования энергии с применением нанотехнологий и наноматериалов	1. Сравнить длины свободного пробега электронов и фононов в золоте при 1K и 100K 2. Вычислить среднее число фононов $10^{13} \text{сек}^{-1} \text{сек}^{-1}$ в пределе $k_B T > \hbar \omega$ при 300K и 400K 3. Вычислить длину свободного пробега фононов в кристалле гелия при 1K

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-3. Кинетические методы в переносе тепла в наноструктурах

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 30

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа.

Краткое содержание задания:

Найти де-бройлевскую длину электронов при температурах 1K, 5K и 100K

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: проводить тепловые расчеты в наноматериалах и нанотехнологиях	1. Найти де-бройлевскую длину электронов при температурах 1К, 5К и 100К 2. Вычислить длину свободного пробега электронов в меди при комнатной температуре и температуре 200 0С, исходя из теплопроводности, теплоемкости и скорости электронного газа 3. Найти дебаевскую (максимальную) частоту для кристаллов фосфора

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-4. Тепловая стабильность работы наноматериалов, нанотехнологий и наноустройств

Формы реализации: Устная форма

Тип контрольного мероприятия: Коллоквиум

Вес контрольного мероприятия в БРС: 35

Процедура проведения контрольного мероприятия: Коллоквиум.

Краткое содержание задания:

Ответить на поставленный теоретический вопрос

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: проводить расчеты энергоэффективности типовых нанотехнологических устройств	1. «Горячие точки» в микро- и нанoeлектронике 2. Закон Мура и «тепловая стена» 3. Отвод тепла от микро- и нанoeлектронных устройств: механизмы и примеры 4. Процессы теплосъема с интегрального микрочипа и методы термостабилизации 5. Теплоперенос в нанопроволоках.

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
	Вклад размерных эффектов 6.Теплоперенос в углеродных нанотрубках. Вклад размерных эффектов 7.Теплоперенос в графене и его особенности.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

3 семестр

КМ-5. Размерные эффекты и теплопереноса в одномерных, двумерных и трехмерных наноструктурах

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 15

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа.

Краткое содержание задания:

Ответить на теоретический вопрос

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: выбор параметров тепловых процессах в наносистемах и наноструктурированных материалах, особенностях размерных эффектов и теплопереноса в одномерных, двумерных и трехмерных наноструктурах	1.Эффективная теплопроводность нанокompозитов; учет граничного термического сопротивления Капицы 2.Особенности тепловых свойств различных нанокompозитов; теплопроводность графеновых нанокompозитов 3.Вязкость наножидкостей: эксперименты и теоретические

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
	модели 4.Теплопроводность наножидкостей: эксперименты и простейшие модели 5.Граничное термосопротивление (сопротивление Капицы); общие представления 6.Модель акустического импеданса (АММ) 7.Модель диффузионного импеданса (DMM)

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-6. Механизмы переноса тепла в наножидкостях

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа.

Краткое содержание задания:

Решить задачу

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Знать: механизмы переноса тепла в наножидкостях и нанокompозитах, в наноструктурированных термоэлектрических материалах	1.Вычислить контактный угол для капли воды на поверхности гладкого никеля при температурах 20, 30, 50 и 70 °С в воздухе. Построить температурную зависимость контактного угла. 2.Вычислить среднюю длину свободного пробега газовых молекул воздуха через

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
	плотность молекул идеального газа при температурах 300К, 400К и 500К при атмосферном давлении.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-7. Наноструктурированные термоэлектрические материалы

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 35

Процедура проведения контрольного мероприятия: Контрольная работа.

Краткое содержание задания:

Решить задачу

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: подбирать наножидкости и нанокомпозиты для типовых нанотехнологических устройств	1.Вычислить энергии Гиббса для капли воды, радиусом 1 мм, 2 мм и 5 мм, лежащей на шероховатой поверхности меди с долями твердой фазы $f_s = 0.1; 0.2; 0.5$ при комнатной температуре при различном отношении несмоленной и смоченной жидкостью части $r_f = 0.1; 0.5$ 2.Вычислить теплопроводность газообразных гелия и азота при температурах 300К, 400К и 500К при атмосферном давлении и построить зависимость теплопроводности от температуры.

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

КМ-8. Разработка новых технологий на основе наножидкостей и нанокompозитов

Формы реализации: Устная форма

Тип контрольного мероприятия: Коллоквиум

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Коллоквиум.

Краткое содержание задания:

Ответить на вопрос

Контрольные вопросы/задания:

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
Уметь: проводить тепловые расчеты в наножидкостях и нанокompозитах, в наноструктурированных термоэлектрических материалах	1.Основные свойства термоэлектрических материалов. 2.Эффективность термоэлектрического преобразования. Добротность преобразования 3.Термоэлектрические наноматериалы и их особенности 4.Критерии добротности термоэлектрических материалов 5.Теплоперенос излучением в классической теплофизике и его ограничения 6.Наномасштабный радиационный теплоперенос 7.Флуктуации электромагнитного поля и тепловой поток. Когерентный и некогерентный радиационный перенос тепла 8.Тепловое излучение наноструктур в дальней зоне. 9.Тепловое излучение наноструктур в ближней зоне 10.Тепловое излучение через малый вакуумный зазор. Резонансное

Запланированные результаты обучения по дисциплине	Вопросы/задания для проверки
	туннелирование и увеличение теплового потока

Описание шкалы оценивания:

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "отлично" выставляется если задание выполнено в полном объеме или выполнено преимущественно верно

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "хорошо" выставляется если большинство вопросов раскрыто. выбрано верное направление для решения задач

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "удовлетворительно" выставляется если задание преимущественно выполнено

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Оценка "неудовлетворительно" выставляется если задание выполнено неверно или преимущественно не выполнено

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

2 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

1. Основные носители энергии в конденсированном теле и их свойства
2. Пространственные масштабы при внутреннем переносе энергии и тепла.

Процедура проведения

Студент получает билет и готовится к ответу 60 минут, далее устный ответ по билету и на дополнительные вопросы.

1. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины

1. Компетенция/Индикатор: ИД-2_{ПК-1} Владеет навыками расчета теплогидравлических процессов в элементах энергетического оборудования, навыки постобработки результатов расчетов и компьютерного моделирования этих процессов

Вопросы, задания

1. Характерные объекты нанотеплофизики; особенности переноса тепла
2. Основные масштабы и размеры в нанотеплофизике
3. Микроскопические основы термопереноса. Происхождение носителей тепла
4. Кристаллическая решетка и фононы
5. Колебания кристаллической решетки: один атом в ячейке
6. Колебания кристаллической решетки: два атома в ячейке
7. Акустические и оптические моды в кристалле
8. Понятие дисперсионных кривых и энергетического спектра
9. Фононы в конденсированном теле и их основные свойства
10. Теплоемкость электронного газа
11. Теплопроводность электронного газа

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Найти дебаевскую (максимальную) частоту для кристаллов кремния
2. Основные носители энергии в конденсированном теле и их свойства
3. Особенности тепловой стабильности электронных устройств
4. «Горячие точки» в микро- и наноэлектронике
5. Отвод тепла от микро- и наноэлектронных устройств: механизмы и примеры
6. Кремниевая наноэлектроника – проблемы охлаждения
7. Кристаллическая решетка и фононы
8. Понятие дисперсионных кривых и энергетического спектра
9. Спин и статистика фононов; функция распределения фононов по энергиям
10. Дебаевская частота и дебаевская температура
11. Процессы рассеяния фононов и законы сохранения
12. Схема различных режимов переноса с учетом размерных эффектов; баллистический, переходный и диффузионный режимы
13. Теплоперенос в углеродных нанотрубках и графене

2. Компетенция/Индикатор: ИД-2ПК-3 Знает основные направления развития и современные тенденции при расчете и анализе эффективности наноразмерных систем и устройств

Вопросы, задания

1. Основные носители энергии в конденсированном теле и их свойства
2. Пространственные масштабы при внутреннем переносе энергии и тепла.
3. Временные масштабы при внутреннем переносе энергии и тепла
4. Особенности тепловой стабильности электронных устройств
5. «Горячие точки» в микро- и наноэлектронике
6. Закон Мура и «тепловая стена»
7. Понятие утилизации тепла и охлаждение электронных устройств
8. Понятие термоменеджмента в электронике и методы его осуществления
9. Отвод тепла от микро- и наноэлектронных устройств: механизмы и примеры
10. Процессы теплосъема с интегрального микрочипа и методы термостабилизации
11. Кремниевая наноэлектроника – проблемы охлаждения
12. Спин и статистика фононов; функция распределения фононов по энергиям
13. Плотность числа состояний фононов
14. Фазовая и групповая скорости фононов
15. Дебаевская частота и дебаевская температура
16. Среднее число фононов при низких и высоких температурах
17. Теплоемкость кристаллической решетки, модель и формула Дебая, соотношение Дюлонга-Пти
18. Фононная теплопроводность диэлектриков
19. Ангармонические колебание кристаллической решетки и взаимодействие фононов
20. Процессы рассеяния фононов и законы сохранения
21. Нормальные процессы рассеяния фононов и процессы с перебросом
22. Кинетическое уравнение Больцмана для фононов, качественный анализ
23. Приближение времени релаксации для уравнения Больцмана
24. Времена релаксации фононов при различных процессах рассеяния
25. Правило Маттиссена для времени релаксации фононов
26. Вычисление теплопроводности фононов из линейного уравнения Больцмана
27. Проблемы описания переноса тела с учетом размерных эффектов
28. Схема различных режимов переноса с учетом размерных эффектов; баллистический, переходный и диффузионный режимы
29. Влияние границы на рассеяние фононов
30. Теплоперенос в нанопроволоках. Вклад размерных эффектов
31. Теплоперенос в углеродных нанотрубках. Вклад размерных эффектов
32. Теплоперенос в графене и его особенности.
33. Перенос тепла электронами.

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Вычислить частоты колебаний кристаллической решетки графита при волновых числах, близких к $\frac{\pi}{a}$
2. Вычислить длину свободного пробега фононов в углерода (алмазе) при 1К и 100К
3. Найти максимальную оптическую частоту для кристаллов хлорида калия
4. Сравнить длины свободного пробега электронов и фононов в серебре при 1К и 100К

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Работа не выполнена или выполнена преимущественно неправильно

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

3 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

1. Микро- и нанотермогидродинамика. Особенности размерных эффектов в термогидродинамике
2. Объемные термоэлектрические наноматериалы

Процедура проведения

Студент получает билет и готовится к ответу 60 минут, далее устный ответ по билету и на дополнительные вопросы.

I. Перечень компетенций/индикаторов и контрольных вопросов проверки результатов освоения дисциплины

1. Компетенция/Индикатор: ИД-2_{ПК-1} Владеет навыками расчета теплогидравлических процессов в элементах энергетического оборудования, навыки постобработки результатов расчетов и компьютерного моделирования этих процессов

Вопросы, задания

- 1.Термогидродинамика на мезо- и наномасштабах. Число Кнудсена, кнудсеновский слой и особенности течений
- 2.Термоэлектричество в нанопроволоках и нанотрубках
- 3.Схема основных приближений и характерные масштабы режимов в широком диапазоне чисел Кнудсена
- 4.Основные свойства термоэлектрических наноматериалов. Квантовые точки и сверхрешетки
- 5.Поток тепла в баллистическом режиме. Кнудсеновский слой с учетом теплопереноса
- 6.Перспективные термоэлектрические материалы

7. Флуктуации электромагнитного поля и тепловой поток. Когерентный и некогерентный радиационный перенос тепла

2. Компетенция/Индикатор: ИД-2_{ПК-3} Знает основные направления развития и современные тенденции при расчете и анализе эффективности наноразмерных систем и устройств

Вопросы, задания

1. Микро- и нанотермогидродинамика. Особенности размерных эффектов в термогидродинамике
2. Объемные термоэлектрические наноматериалы
3. Гидродинамика и граничные условия. Граничное условие Стокса. Граничное условие скольжения – условие Навье.
4. Термоэлектрические свойства стандартных материалов
5. Модели длины скольжения. Экспериментальные методы измерения длины скольжения
6. Эффективность термоэлектрического преобразования. Показатель добротности
7. Проблемы наногидродинамики и перенос жидкостей внутри нанотрубок
8. Основные понятия термоэлектричества. Эффекты Пельтье и Зеебека
9. Межфазные границы и капиллярность. Модели смачивания
10. Тепловое излучение через малый вакуумный зазор. Резонансное туннелирование и увеличение теплового потока
11. Супергидрофильность и супергидрофобность. Эффект лотоса.
12. Тепловое излучение наноструктур в дальней зоне. Тепловое излучение наноструктур в ближней зоне
13. Испарение капель на мезо- и наноструктурированных подложках

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Вычислить контактный угол для капли спирта на поверхности гладкого никеля при температурах 20, 30, 50 и 70 °С в воздухе. Построить температурную зависимость контактного угла.
2. Вычислить среднюю длину свободного пробега газовых молекул воздуха через плотность молекул идеального газа при температурах 300К, 400К и 500К при атмосферном давлении.
3. Вычислить профиль скорости при течении Пуазейля в цилиндрическом канале с учетом длины скольжения, равной 100, 200, 300 и 500 нм при перепадах давления 0,1, 0,2 и 0,3 атм в каналах, диаметром 100 мкм, 10 мкм, 1 мкм.
4. Вычислить энергии Гиббса для капли воды, радиусом 1 мм, 2 мм и 5 мм, лежащей на шероховатой поверхности меди с долями твердой фазы $f_s = 0.1; 0.2; 0.5$ при комнатной температуре при различном отношении несмоченной и смоченной жидкостью части $r_f = 0.1; 0.5$
5. Вычислить эффективную длину свободного пробега газовых молекул гелия через плотность молекул идеального газа при температурах 400К, 500К и 600К при атмосферном давлении в каналах 1 мкм, 150 нм, 30 нм и 10 нм; построить температурную зависимость.
6. Нанокompозиты, их типы и основные свойства
7. Эффективная теплопроводность нанокompозитов; учет граничного термического сопротивления Капицы
8. Особенности тепловых свойств различных нанокompозитов; теплопроводность графеновых нанокompозитов
9. Теплопроводность наножидкостей: эксперименты и простейшие модели
10. Граничное термосопротивление (сопротивление Капицы); общие представления
11. Физика смачивания и модели смачивания для различных поверхностей

12. Управление процессами смачиваемости на наношероховатых и супергидрофобных поверхностях
13. Особенности испарение капель на мезо- и наноструктурированных подложках
14. Эффект Лейденфроста и его особенности
15. Физика кипения на наноструктурированных поверхностях
16. Явления термоэлектричества, их особенности и проявления. Эффекты Пельтье, Зеебека и Томсона.
17. Критерии добротности термоэлектрических материалов
18. Наномасштабный радиационный теплоперенос
19. Флуктуации электромагнитного поля и тепловой поток. Когерентный и некогерентный радиационный перенос тепла
20. Тепловое излучение через малый вакуумный зазор. Резонансное туннелирование и увеличение теплового потока

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5 («отлично»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 70

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "продвинутого" уровня. Ответы даны верно, четко сформулированные особенности практических решений

Оценка: 4 («хорошо»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "базового" уровня. Большинство ответов даны верно. В части материала есть незначительные недостатки

Оценка: 3 («удовлетворительно»)

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения знания: Работа выполнена в рамках "порогового" уровня. Основная часть задания выполнена верно. на вопросы углубленного уровня

Оценка: 2 («неудовлетворительно»)

Описание характеристики выполнения знания: Работа не выполнена или выполнена преимущественно неправильно

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу