

**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: Физика и техника низких температур

Уровень образования: высшее образование - магистратура

Форма обучения: Очная

**Оценочные материалы
по дисциплине
Процессы переноса в существенно неравновесных системах**

**Москва
2023**

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ РАЗРАБОТАЛ:

Преподаватель

(должность)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Крюков А.П.
	Идентификатор	R9b81f956-KryukovAP-8dacf4ed

(подпись)

А.П. Крюков

(расшифровка
подписи)

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель
образовательной
программы

(должность, ученая степень, ученое
звание)

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Крюков А.П.
	Идентификатор	R9b81f956-KryukovAP-8dacf4ed

(подпись)

А.П. Крюков

(расшифровка
подписи)

Заведующий
выпускающей кафедры

(должность, ученая степень, ученое
звание)

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

(подпись)

Ю.Ю.

Пузина

(расшифровка
подписи)

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-3 Умеет применять различные подходы к расчету процессов теплообмена в зависимости от режимных параметров работы элементов энергетического оборудования

и включает:

для текущего контроля успеваемости:

Форма реализации: Письменная работа

1. Определение тепловых нагрузок и скоростей движения межфазных поверхностей при кипении сверхтекучего гелия (Контрольная работа)
2. Расчет термических сопротивлений при испарении и конденсации (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Методы определения форм межфазных поверхностей (Коллоквиум)
2. Применение кинетического уравнения Больцмана для решения задач тепло-массопереноса на границах раздела фаз (Коллоквиум)

БРС дисциплины

2 семестр

Раздел дисциплины	Веса контрольных мероприятий, %				
	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
	Срок КМ:	6	8	12	16
Постановка задач расчета испарения и конденсации однокомпонентной среды и парогазовых смесей					
Постановка задач расчета испарения и конденсации однокомпонентной среды и парогазовых смесей			+		
Методы расчета термических сопротивлений, определенных в п.1					
Методы расчета термических сопротивлений, определенных в п.1			+		
Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации					
Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации			+		
Результаты исследования задач испарения-конденсации					

Результаты исследования задач испарения-конденсации			+	
Решение прикладных задач				
Кипение сверхтекучего гелия			+	
Процессы криовакуумирования	+			
Конденсация паров металлов	+			
Определение форм межфазных поверхностей при переноса массы, импульса, энергии.				+
Сонолюминесценция				+
Вес КМ:	25	20	35	20

\$Общая часть/Для промежуточной аттестации\$

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-ЗПК-1 Умеет применять различные подходы к расчету процессов теплообмена в зависимости от режимных параметров работы элементов энергетического оборудования	Знать: способы расчета существенно неравновесных процессов переноса с целью применения их на практике для разработки энергонапряженного оборудования, машин и аппаратов высоких технологий расчетно-теоретические и экспериментальные методы исследования теплогидравлических процессов в условиях значительного отклонения от состояния термодинамического равновесия и принципы их моделирования в конкретных технических системах Уметь: анализировать	Применение кинетического уравнения Больцмана для решения задач тепло-массопереноса на границах раздела фаз (Коллоквиум) Расчет термических сопротивлений при испарении и конденсации (Контрольная работа) Определение тепловых нагрузок и скоростей движения межфазных поверхностей при кипении сверхтекучего гелия (Контрольная работа) Методы определения форм межфазных поверхностей (Коллоквиум)

		информацию о технологиях осуществления существенно неравновесных процессов переноса применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты;	
--	--	--	--

II. Содержание оценочных средств. Шкала и критерии оценивания

КМ-1. Применение кинетического уравнения Больцмана для решения задач тепло-массопереноса на границах раздела фаз

Формы реализации: Устная форма

Тип контрольного мероприятия: Коллоквиум

Вес контрольного мероприятия в БРС: 25

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студенту выдается задание, дается время на решение, затем производится опрос.

Краткое содержание задания:

Привести расчетно-теоретические и экспериментальные методы исследования теплогидравлических процессов в условиях значительного отклонения от состояния термодинамического равновесия и принципы их моделирования в конкретных технических системах. Описать наиболее часто используемые методы решения кинетического уравнения Больцмана.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: способы расчета существенно неравновесных процессов переноса с целью применения их на практике для разработки энергонапряженного оборудования, машин и аппаратов высоких технологий	1. Термические сопротивления: внешнее (газодинамическое), межфазное, пленки конденсата. Роль каждого в зависимости от интенсивности процесса. 2. Обзор методов решения кинетического уравнения Больцмана применительно к задачам испарения-конденсации. Линейная теория. Моментный метод решения одномерных задач. Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана (для разных чисел Кнудсена, многомерные задачи). Прямое статистическое моделирование. Модельные уравнения.
--	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: зачтено

Описание характеристики выполнения знания: Задание выполнено, даны ответы на дополнительные вопросы.

Оценка: не зачтено

Описание характеристики выполнения знания: Задание не выполнено

КМ-2. Расчет термических сопротивлений при испарении и конденсации

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Слепой выбор билета с номером варианта контрольной работы, время на решение.

Краткое содержание задания:

На вертикальной медной стенке толщиной $\delta=1\text{мм}$ и высотой $H = 0,1\text{м}$ конденсируется газообразный кислород при атмосферном давлении. С другой стороны эта стенка охлаждается потоком жидкого азота, находящимся в состоянии насыщения при атмосферном давлении и движущемся вдоль поверхности стенки со скоростью 1м/с . Чему равна температура стенки?

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: применять современные методы исследования, проводить технические испытания и (или) научные эксперименты;	1.Решение уравнения сохранения энергии в интегральной формулировке для задач интенсивного испарения и конденсации в рамках механики сплошных сред. 2.Применение законов сохранения в дифференциальной форме для решения задачи о конденсации чистого пара на поверхности. 3.Законы сохранения в виде выражений молекулярно-кинетической теории. Расчет теплового потока для свободномолекулярного предела. 4.Приближенный метод определения теплопереноса через слой разреженного газа при произвольных числах Кнудсена. Примеры применения для наноразмерных систем 5.Определение плотности потока массы при интенсивной конденсации с помощью приближенного соотношения, полученного на базе молекулярно-кинетической теории. Сравнение с результатами применения традиционного подхода 6.Влияние коэффициентов испарения и конденсации. Способ пересчета результатов решения задачи об интенсивной конденсации 7.Предельные значения коэффициентов конденсации и удельных потоков массы 8.Применение методов молекулярной динамики для задач энерго-массопереноса в двухфазных системах 9.Испарение и конденсация при наличии неконденсируемых компонентов 10.Определение предельной плотности газа при закипании конденсации из парогазовой среды
--	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: зачтено

Описание характеристики выполнения знания: Все задачи решены.

Оценка: не зачтено

Описание характеристики выполнения знания: Задачи не решены

КМ-3. Определение тепловых нагрузок и скоростей движения межфазных поверхностей при кипении сверхтекучего гелия

Формы реализации: Письменная работа

Тип контрольного мероприятия: Контрольная работа

Вес контрольного мероприятия в БРС: 35

Процедура проведения контрольного мероприятия: Слепой выбор билета с номером варианта контрольной работы, время на решение.

Краткое содержание задания:

В капилляре находится объем сверхтекучего гелия, длина которого l составляет $10,4$ см. Температура гелия равна $1,7$ К. При подаче к одной из межфазных поверхностей тепловой нагрузки 60 Вт/м² перемычка гелия II приходит в движение к источнику теплоты. Определите наибольший диаметр, при котором это возможно. Укажите направление движения перемычки и найдите ее скорость при вдвое большем диаметре.

Контрольные вопросы/задания:

Уметь: анализировать информацию о технологиях осуществления существенно неравновесных процессов переноса	1. Расчет восстановительных нагрузок при кипении гелия-II на нагревателях цилиндрической и шаровой формы 2. Эволюция паровых пленок при кипении гелия-II. Приближенный подход и расчет на основе уравнения Рэлея 3. Движение перемычек гелия-II в капиллярах при наличии осевого теплового потока 4. Определение формы межфазной поверхности азота при плавлении в нем капли воды. Отличия от традиционных «гидростатических» задач 5. Особенности эволюции паровых образований на нагревателях цилиндрической и шаровой формы, погруженных в жидкости с низкой и высокой эффективностью теплопереноса 6. Применение уравнения Рэлея для решения задачи о схлопывании парогазового пузыря при сонолюминесценции. Приближенное описание явления формирования ударной волны внутри пузыря
--	---

Описание шкалы оценивания:

Оценка: зачтено

Описание характеристики выполнения знания: Задача решена

Оценка: не зачтено

Описание характеристики выполнения знания: Задача не решена

КМ-4. Методы определения форм межфазных поверхностей

Формы реализации: Устная форма

Тип контрольного мероприятия: Коллоквиум

Вес контрольного мероприятия в БРС: 20

Процедура проведения контрольного мероприятия: Студенту выдается задание, дается время на решение, затем производится опрос.

Краткое содержание задания:

Перечислить известные методы определения форм межфазных поверхностей, дать каждому подробное объяснение.

Контрольные вопросы/задания:

Знать: расчетно-теоретические и	1. Кривая кипения сверхтекучего гелия. Пиковая и
---------------------------------	--

экспериментальные методы исследования теплогидравлических процессов в условиях значительного отклонения от состояния термодинамического равновесия и принципы их моделирования в конкретных технических системах	"восстановительная" тепловая нагрузка. Расчет "восстановительной" тепловой нагрузки по линейной теории и в общем случае. Перенос тепла через паровую пленку для нелинейных задач в одномерной и двумерной постановке. Перенос массы и энергии в ограниченной паровой области при наличии градиента температур на межфазной поверхности. Расчет эволюции паровой пленки при больших тепловых нагрузках для плоского, цилиндрического и сферического нагревателей. Особенности теплообмена в HeII при пониженной гравитации. Задачи теплопереноса в капиллярно-пористом теле, заполненном HeII. Расчет процессов переноса в единичном капилляре при наличии продольного теплового потока. 2. Роль направленности потоков при криоконденсации (десублимации). Расчет теплопереноса в области неприменимости законов градиентного типа. Примеры расчета течений, характеризуемых малыми числами Кнудсена, с учетом сильной неравновесности на межфазной границе. 3. Роль процессов переноса на межфазной поверхности при определении общего термического сопротивления в системе: пар – пленка конденсата – стенка конденсатора – охлаждающий теплоноситель. Влияние неконденсируемых газов. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными. 4. Зависимость формы межфазной поверхности от способа подвода теплоты к границе раздела фаз пар-жидкость. Соответствующая классификация задач тепломассопереноса. Плавание горячих капель в холодных жидкостях. Пленочное кипение недогретой воды на нагревателях различной формы. Эволюция паровых пленок. Необходимость применения при описании неравновесных граничных условий. 5. Сущность явления. Математическое описание: уравнения сохранения для жидкости и парогазовой смеси; универсальные и специальные условия совместности. Влияние испарения-конденсации на межфазной поверхности на характеристики процесса.
--	--

Описание шкалы оценивания:

Оценка: зачтено

Описание характеристики выполнения знания: Задание выполнено

Оценка: не зачтено

Описание характеристики выполнения знания: Задание не выполнено

СОДЕРЖАНИЕ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

2 семестр

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Пример билета

1. Результаты исследования процессов интенсивного испарения и конденсации методами молекулярно-кинетической теории.
2. Получите решения уравнений сохранения импульса для задачи пленочной конденсации неподвижного в продольном направлении водяного пара на вертикальной поверхности высотой $H = 0.1 \text{ м}$. Найдите скорости движения пара и жидкости вблизи границы раздела фаз, если известно, что давление конденсирующегося пара 105 Па , а температура поверхности, на которой осуществляется конденсация, поддерживается постоянной и равной $T_w = 363 \text{ К}$.

Процедура проведения

Слепой выбор билета, время для ответа, ответ преподавателю

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

1. Компетенция/Индикатор: ИД-ЗПК-1 Умеет применять различные подходы к расчету процессов тепломассопереноса в зависимости от режимных параметров работы элементов энергетического оборудования

Вопросы, задания

- 1.1. Исследование задач испарения и конденсации на основе интегральной формулировки законов сохранения массы, импульса, энергии для сплошных сред
2. В капилляре находится объем сверхтекучего гелия, длина которого l составляет $10,4 \text{ см}$. Температура гелия равна $1,7 \text{ К}$. При подаче к одной из межфазных поверхностей тепловой нагрузки 60 Вт/м^2 перемычка гелия II приходит в движение к источнику теплоты. Определите наибольший диаметр, при котором это возможно. Укажите направление движения перемычки и найдите ее скорость при вдвое большем диаметре. Гелий II при $T = 1,70 \text{ К}$

Плотность (кг/м ³)	η (Па·с)	S (Дж/кг·К)	Плотность (кг/м ³)	r (Дж/кг)
145,3	$1,3 \cdot 10^{-6}$	398,0	0,4	22000,0

2. 1. Применение законов сохранения в дифференциальном виде для решения задачи о конденсации чистого пара
2. В плоской пластине из нержавеющей стали толщиной 2 мм , находящейся в окружающей среде при нормальном давлении, проделали 100 параллельных продольных сквозных зазоров, каждый из которых имеет толщину 10 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Температура левой поверхности пластины равна 298 К , а правой 293 К . Чему равна плотность теплового потока, передаваемого через пластину? Теплопроводность нержавеющей стали – 14 Вт/м·К .
- 3.1. Представление законов сохранения методами молекулярно-кинетической теории. Расчет теплового потока для свободномолекулярного предела и переходной области

2. На вертикальной медной стенке толщиной $\delta = 1 \text{ мм}$ и высотой $H = 0,1 \text{ м}$ конденсируется газообразный аргон при атмосферном давлении. С другой стороны эта стенка охлаждается потоком жидкого азота, находящимся в состоянии насыщения при атмосферном давлении и движущемся вдоль поверхности стенки с определенной скоростью. Чему должна быть равна величина этой скорости для того, чтобы на стенке формировался твердый аргон?

4.1. Описание испарения и конденсации методами физической кинетики. Линейная теория Д.А.Лабунцова.

2. Полусферический нагреватель радиусом $R_w = 5 \text{ мм}$ опускается в насыщенный азот при атмосферном давлении. Температура нагревателя $T_w = 40^\circ \text{C}$ такова, что на поверхности образуется паровая пленка, как показано на рисунке. Определить расстояние от перегиба межфазной поверхности до зеркала жидкости, если толщина паровой пленки в этом месте $d = 0,3 \text{ мм}$.

5.1. Результаты исследования процессов интенсивного испарения и конденсации методами молекулярно-кинетической теории.

2. Получите решения уравнений сохранения импульса для задачи пленочной конденсации неподвижного в продольном направлении водяного пара на вертикальной поверхности высотой $H = 0,1 \text{ м}$. Найдите скорости движения пара и жидкости вблизи границы раздела фаз, если известно, что давление конденсирующегося пара 105 Па , а температура поверхности, на которой осуществляется конденсация, поддерживается постоянной и равной $T_w = 363 \text{ К}$.

6.1. Коэффициенты испарения и конденсации. Определения этих понятий. Методика расчета интенсивностей соответствующих процессов переноса для диффузной схемы испарения и отражения молекул при произвольных значениях коэффициентов испарения и конденсации. Их предельные значения.

2. На межфазную поверхность, поддерживаемую при постоянной температуре T_s , натекает поток газообразного азота со скоростью, соответствующей числу Маха $M_\infty = 0,65$, в режиме одномерной стационарной десублимации. При коэффициенте конденсации $\beta = 1$ отношение $P_\infty/P_s = 8,0$, где P_s – давление насыщения, соответствующее температуре межфазной поверхности T_s , а P_∞ – давление натекающего аргона. Чему равно отношение температуры пара вдали от границы раздела фаз T_∞ к T_s ? Для какого отношения давлений P_∞/P_s возможно поддержание заданного числа Маха $M_\infty = 0,65$ при $\beta = 0,9$ и $\beta = 0,8$?

7.1. Применение законов сохранения в дифференциальном виде для решения задачи о конденсации чистого пара.

2. На межфазную поверхность, поддерживаемую при постоянной температуре T_s , натекает поток газообразного аргона со скоростью, соответствующей числу Маха $M_\infty = 0,7$, в режиме одномерной стационарной десублимации. При коэффициенте конденсации $\beta = 1$ отношение $P_\infty/P_s = 5,0$, где P_s – давление насыщения, соответствующее температуре межфазной поверхности T_s , а P_∞ – давление натекающего аргона. Чему равно отношение температуры пара вдали от границы раздела фаз T_∞ к T_s ? Для какого отношения давлений P_∞/P_s возможно поддержание заданного числа Маха $M_\infty = 0,7$ при $\beta = 0,93$ и $\beta = 0,85$?

8.1 Исследование задач испарения и конденсации на основе интегральной формулировки законов сохранения массы, импульса, энергии для сплошных сред.

2. Определите при какой глубине погружения в гелий II плоского нагревателя на нем осуществляется стационарное бесшумовое кипение для величины удельного теплового потока, выделяемого нагревателем $q_w = 0,95 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$. При этом значении q_w

обеспечивается постоянство толщины паровой пленки для искомой глубины погружения нагревателя. Температура свободной межфазной поверхности гелий II - пар T_i равняется 2 K .

9.1. Основные принципы молекулярно-динамического моделирования (МД). Характерные пространственные и временные масштабы. Возможности МД. Расчет коэффициентов конденсации методами МД.

2. При стационарном бесшумовом кипении на плоском нагревателе, погруженном в гелий II на определенную глубину h , образовалась паровая пленка. Толщина этой пленки d с течением времени остается постоянной. Чему равно значение d , если известно, что давление пара P^2 в пленке равняется 3884 Па , температура свободной межфазной поверхности гелий II - пар T_i равняется 2 K , температура поверхности нагревателя T_W , при которой обеспечивается поддержание заданного значения d равняется 64 K . Принять в первом приближении, что теплопроводность газообразного гелия при 33 K равна $0.04\text{ Вт/м}\cdot\text{K}$.

10.1. Классификация задач тепломассопереноса при определении форм межфазных поверхностей жидкость – пар. Применение различных методов для соответствующих описаний.

2. Определите при какой глубине погружения в гелий II плоского нагревателя на нем осуществляется стационарное бесшумовое кипение для величины удельного теплового потока, выделяемого нагревателем $qW = 104\text{ Вт/м}^2$. При этом значении qW обеспечивается постоянство толщины паровой пленки для искомой глубины погружения нагревателя. Температура свободной межфазной поверхности гелий II - пар T_i равняется 2 K .

Материалы для проверки остаточных знаний

1. Что такое конденсация

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: Процесс фазового перехода из газообразного в жидкое состояние

2. Что такое Число Кнудсена

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: Один из критериев подобия движения разреженных газов

3. Что такое средняя длина свободного пробега

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: это среднее расстояние, которое пролетает частица за время между двумя последовательными столкновениями

4. Какие вам известны методы решения кинетического уравнения Больцмана

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: Линейная теория. Моментный метод решения одномерных задач.

Прямое численное решение кинетического уравнения Больцмана (для разных чисел Кнудсена, многомерные задачи). Прямое статистическое моделирование. Модельные уравнения.

5. Что такое сонолюминесценция

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: Явление возникновения вспышки света при схлопывании кавитационных пузырьков, рождённых в жидкости мощной ультразвуковой волной.

6. Что такое кавитация?

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: физический процесс образования пузырьков (каверн, или пустот) в жидких средах, с последующим их схлопыванием и высвобождением большого количества энергии

7. При какой температуре гелий переходит в сверхтекучее состояние

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: около 2,17 К

8. При какой температуре азот становится жидким

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: 77 К

9. Что такое испарение

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: Процесс фазового перехода из жидкого в газообразное состояние

10. Что стоит в правой части кинетического уравнения Больцмана

Ответы:

Дать устный ответ и/или написать формулу

Верный ответ: Интеграл столкновений

II. Описание шкалы оценивания

Оценка: 5

Нижний порог выполнения задания в процентах: 80

Описание характеристики выполнения задания: Дан полный ответ на вопрос, решена задача

Оценка: 4

Нижний порог выполнения задания в процентах: 60

Описание характеристики выполнения задания: Дан ответ на вопрос, задача решена с неточностями

Оценка: 3

Нижний порог выполнения задания в процентах: 50

Описание характеристики выполнения задания: Дан ответ на вопрос, задача решена частично - ход решения указан

III. Правила выставления итоговой оценки по курсу

Оценка определяется в соответствии с Положением о балльно-рейтинговой системе для студентов НИУ «МЭИ» на основании семестровой и экзаменационной составляющих