

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

---

Направление подготовки/специальность: 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика

Наименование образовательной программы: Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике

Уровень образования: высшее образование - бакалавриат

Форма обучения: Очная


**Рабочая программа дисциплины**  
**ПРОЦЕССЫ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ**

<b>Блок:</b>	<b>Блок 1 «Дисциплины (модули)»</b>
<b>Часть образовательной программы:</b>	<b>Часть, формируемая участниками образовательных отношений</b>
<b>№ дисциплины по учебному плану:</b>	<b>Б1.Ч.01</b>
<b>Трудоемкость в зачетных единицах:</b>	<b>8 семестр - 4;</b>
<b>Часов (всего) по учебному плану:</b>	<b>144 часа</b>
<b>Лекции</b>	<b>8 семестр - 14 часов;</b>
<b>Практические занятия</b>	<b>8 семестр - 28 часа;</b>
<b>Лабораторные работы</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Консультации</b>	<b>8 семестр - 2 часа;</b>
<b>Самостоятельная работа</b>	<b>8 семестр - 99,5 часа;</b>
<b>в том числе на КП/КР</b>	<b>не предусмотрено учебным планом</b>
<b>Иная контактная работа</b>	<b>проводится в рамках часов аудиторных занятий</b>
<b>включая:</b> <b>Перекрестный опрос</b> <b>Контрольная работа</b>	
<b>Промежуточная аттестация:</b>	
<b>Экзамен</b>	<b>8 семестр - 0,5 часа;</b>

**Москва 2023**

**ПРОГРАММУ СОСТАВИЛ:**


Преподаватель

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

А.П. Крюков


**СОГЛАСОВАНО:**

Руководитель  
образовательной программы

	Подписано электронной подписью ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»	
	Сведения о владельце ЦЭП МЭИ	
	Владелец	Дмитриев А.С.
	Идентификатор	R8d0ce031-DmitriyevAS-aaaae29

А.С. Дмитриев

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

## 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Цель освоения дисциплины:** изучение основ физических явлений на поверхности конденсированных сред, а также методов моделирования соответствующих процессов на границе раздела фаз

### Задачи дисциплины

- приобретение навыков осуществления «вакуумных» и «криовакуумных» расчетов;
- ознакомление со способами исследования поверхностей;
- изучение основ адсорбции и десорбции;
- овладение практикой расчета теплоты адсорбции, параметров различных изотерм сорбции;
- овладение методами моделирования элементарных процессов на поверхности;
- изучение основ физики процессов переноса на поверхности сверхтекучего гелия (He II);
- овладение методикой расчета коэффициентов отражения звука от поверхности He II и движения перемычек He II в капилляре.

Формируемые у обучающегося **компетенции** и запланированные **результаты обучения** по дисциплине, соотнесенные с **индикаторами достижения компетенций**:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции	Запланированные результаты обучения
ПК-3 Способен к разработке наноразмерных материалов и устройств	ИД-2 <sub>ПК-3</sub> Знает методы определения параметров эффективных низкоразмерных устройств и способен провести их оценку	знать: - возможности и особенности применения различных методов исследования поверхностей; - основы физики адсорбции и десорбции и специфику процессов переноса на поверхности сверхтекучего гелия.  уметь: - выполнять расчеты проводимости вакуумных трубопроводов и скорости откачки объемов, обосновывать применение метода исследования поверхностей; - осуществлять расчеты теплоты адсорбции и параметров различных изотерм сорбции, применять методы интерпретации экспериментальных данных по взаимодействию молекул газа с межфазной областью.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ВО

Дисциплина относится к основной профессиональной образовательной программе Нанотехнологии и наноматериалы в энергетике (далее – ОПОП), направления подготовки 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика, уровень образования: высшее образование - бакалавриат.

Требования к входным знаниям и умениям:

- знать Термодинамика
- знать Физика (общая)
- знать Математика
- знать Физика конденсированных систем

Результаты обучения, полученные при освоении дисциплины, необходимы при выполнении выпускной квалификационной работы.

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 3.1 Структура дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часа.

№ п/п	Разделы/темы дисциплины/формы промежуточной аттестации	Всего часов на раздел	Семестр	Распределение трудоемкости раздела (в часах) по видам учебной работы										Содержание самостоятельной работы/ методические указания	
				Контактная работа						СР					
				Лек	Лаб	Пр	Консультация		ИКР		ПА	Работа в семестре	Подготовка к аттестации /контроль		
КПР	ГК	ИККП	ТК												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	Поверхность: основные понятия и методы анализа	27	8	3	-	6	-	-	-	-	-	18	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Поверхность: основные понятия и методы анализа"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 3-31 [2], 67-202 [5], 333-349</p>	
1.1	Определение понятия поверхности	9		1	-	2	-	-	-	-	-	6	-		
1.2	Понятия и уравнения вакуумной техники	9		1	-	2	-	-	-	-	-	6	-		
1.3	Методы анализа поверхности	9		1	-	2	-	-	-	-	-	6	-		
2	Адсорбция и десорбция	28		4	-	8	-	-	-	-	-	16	-		<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Адсорбция и десорбция"</p> <p><b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 32-52 [2], 332-362</p>
2.1	Основные определения	7		1	-	2	-	-	-	-	-	4	-		
2.2	Кинетика адсорбции, скорость адсорбции	7		1	-	2	-	-	-	-	-	4	-		
2.3	Анализ экспериментальных данных по криовакуумной откачке гелия	7		1	-	2	-	-	-	-	-	4	-		
2.4	Термическая десорбция	7	1	-	2	-	-	-	-	-	4	-			
3	Моделирование взаимодействий атомов газа с поверхностью твердого тела	32	4	-	10	-	-	-	-	-	18	-	<p><b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Моделирование взаимодействий атомов газа с поверхностью твердого тела"</p>		

3.1	Модели взаимодействий	16	2	-	5	-	-	-	-	-	9	-	<b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [1], 53-77 [3], 5-19
3.2	Численное моделирование взаимодействия атома газа с блоком атомов твердого тела	16	2	-	5	-	-	-	-	-	9	-	
4	Процессы переноса на межфазной поверхности гелия II	21	3	-	4	-	-	-	-	-	14	-	<b><u>Самостоятельное изучение теоретического материала:</u></b> Изучение дополнительного материала по разделу "Процессы переноса на межфазной поверхности гелия II" <b><u>Изучение материалов литературных источников:</u></b> [3], 46-56 [4], 42-44, 69-77
4.1	Отражение звука от межфазной поверхности сверхтекучего гелия	10	1	-	2	-	-	-	-	-	7	-	
4.2	Движение He-II в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока	11	2	-	2	-	-	-	-	-	7	-	
	Экзамен	36.0	-	-	-	-	2	-	-	0.5	-	33.5	
	<b>Всего за семестр</b>	<b>144.0</b>	<b>14</b>	<b>-</b>	<b>28</b>	<b>-</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>66</b>	<b>33.5</b>	
	<b>Итого за семестр</b>	<b>144.0</b>	<b>14</b>	<b>-</b>	<b>28</b>	<b>2</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0.5</b>	<b>99.5</b>			

**Примечание:** Лек – лекции; Лаб – лабораторные работы; Пр – практические занятия; КПр – аудиторные консультации по курсовым проектам/работам; ИККП – индивидуальные консультации по курсовым проектам/работам; ГК- групповые консультации по разделам дисциплины; СР – самостоятельная работа студента; ИКР – иная контактная работа; ТК – текущий контроль; ПА – промежуточная аттестация

### 3.2 Краткое содержание разделов

#### 1. Поверхность: основные понятия и методы анализа

##### 1.1. Определение понятия поверхности

Необходимость вакуумирования при изучении поверхности твердого тела. Время образования монослоя. Расчет быстроты действия насоса в свободномолекулярном и сплошносредном (вязкостном) пределах. Приготовление атомарно-чистой поверхности.

##### 1.2. Понятия и уравнения вакуумной техники

Быстрота действия насоса. Быстрота откачки объема. Проводимость. Поток. Основное уравнение вакуумной техники (область его применения). Криовакуумные насосы.

##### 1.3. Методы анализа поверхности

Дифракция электронов. Электронная спектроскопия. Зондирование ионами. Микроскопия. Сканирующая зондовая микроскопия: тунельная и атомно-силовая (АСМ). Контактный, бесконтактный, полуконтактный режимы АСМ.

#### 2. Адсорбция и десорбция

##### 2.1. Основные определения

Физическая и химическая сорбция. Изотермы, изостеры и изобары сорбции. Нахождение теплоты сорбции по изостерам.

##### 2.2. Кинетика адсорбции, скорость адсорбции

Выражения для изменения количества частиц на единице поверхности в единицу. Выражения для изменения количества монослоев в единицу времени.

##### 2.3. Анализ экспериментальных данных по криовакуумной откачке гелия

Изотермы и изостеры. Коэффициент прилипания. Зависимости давления от времени для режима криозахвата.

##### 2.4. Термическая десорбция

Уравнение Полани-Вигнера. Порядок кинетики десорбции. Получение общего выражения для изотермы сорбции в виде зависимости давления газа от покрытия слоя адсорбатом. Изотермы Генри, Лэнгмюра, Брунауэра, Эммета, Теллера (БЭТ).

#### 3. Моделирование взаимодействий атомов газа с поверхностью твердого тела

##### 3.1. Модели взаимодействий

Модель Бауле для определения коэффициента энергетической аккомодации. Расчет скорости захвата атома на основе решеточной теории. Упрощенный метод расчета взаимодействия атома газа с поверхностью твердого тела на основе модели «треугольной» потенциальной ямы. Сравнение с решеточной теорией.

##### 3.2. Численное моделирование взаимодействия атома газа с блоком атомов твердого тела

Трехмерные задачи. Получение функции распределения молекул, движущихся от границы раздела фаз. Методы анализа экспериментальных данных по отражению молекул газа от границы раздела фаз. Нахождение плотности и температуры для «полумаксвелловской» функции распределения, описывающей поток отраженных от поверхности молекул.

#### 4. Процессы переноса на межфазной поверхности гелия II

##### 4.1. Отражение звука от межфазной поверхности сверхтекучего гелия

Физическая постановка и математическое описание. Коэффициент отражения звука от межфазной поверхности сверхтекучего гелия. Предельные значения. Зависимость от коэффициента конденсации. Коэффициент проницаемости границы раздела фаз.

##### 4.2. Движение He-II в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока

Постановка задачи. Математическое описание. Результаты расчетов и экспериментов.

### **3.3. Темы практических занятий**

1. Расчет проводимости трубопровода и быстроты откачки объема;
2. Расчет теплоты адсорбции по изостерам сорбции и по заданным временам жизни атомов на поверхности твердого тела;
3. Расчет величин покрытия слоя адсорбата по изотермам Генри и Лэнгмюра;
4. Определение значений коэффициентов аккомодации энергии атомов газа на поверхностях твердых тел по различным моделям;
5. Интерпретация экспериментальных данных по отражению молекул газа от границы раздела фаз. Нахождение плотности и температуры для «полумаксвелловской» функции распределения, описывающей поток отраженных от поверхности молекул.

### **3.4. Темы лабораторных работ**

не предусмотрено

### **3.5 Консультации**

#### Групповые консультации по разделам дисциплины (ГК)

1. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Поверхность: основные понятия и методы анализа"
2. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Адсорбция и десорбция"
3. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Моделирование взаимодействий атомов газа с поверхностью твердого тела"
4. Обсуждение материалов по кейсам раздела "Процессы переноса на межфазной поверхности гелия II"

### **3.6 Тематика курсовых проектов/курсовых работ**

Курсовой проект/ работа не предусмотрены



### 3.7. Соответствие разделов дисциплины и формируемых в них компетенций

Запланированные результаты обучения по дисциплине (в соответствии с разделом 1)	Коды индикаторов	Номер раздела дисциплины (в соответствии с п.3.1)				Оценочное средство (тип и наименование)
		1	2	3	4	
<b>Знать:</b>						
основы физики адсорбции и десорбции и специфику процессов переноса на поверхности сверхтекучего гелия	ИД-2ПК-3		+		+	Перекрестный опрос/Основные характеристики процессов адсорбции и десорбции
возможности и особенности применения различных методов исследования поверхностей	ИД-2ПК-3	+				Перекрестный опрос/Приборы и методы анализа поверхности Контрольная работа/Процессы на границе раздела фаз
<b>Уметь:</b>						
осуществлять расчеты теплоты адсорбции и параметров различных изотерм сорбции, применять методы интерпретации экспериментальных данных по взаимодействию молекул газа с межфазной областью	ИД-2ПК-3			+	+	Перекрестный опрос/Основные характеристики процессов адсорбции и десорбции Перекрестный опрос/Приборы и методы анализа поверхности Контрольная работа/Процессы на границе раздела фаз
выполнять расчеты проводимости вакуумных трубопроводов и быстроты откачки объемов, обосновывать применение метода исследования поверхностей	ИД-2ПК-3	+	+	+		Перекрестный опрос/Основные понятия и методы анализа поверхности Перекрестный опрос/Основные характеристики процессов адсорбции и десорбции

## **4. КОМПЕТЕНТНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНАЯ АТТЕСТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ)**

### **4.1. Текущий контроль успеваемости**

**8 семестр**

Форма реализации: Билеты (письменный опрос)

1. Процессы на границе раздела фаз (Контрольная работа)

Форма реализации: Устная форма

1. Основные понятия и методы анализа поверхности (Перекрестный опрос)
2. Основные характеристики процессов адсорбции и десорбции (Перекрестный опрос)
3. Приборы и методы анализа поверхности (Перекрестный опрос)

Балльно-рейтинговая структура дисциплины является приложением А.

### **4.2 Промежуточная аттестация по дисциплине**

*Экзамен (Семестр №8)*

Итоговая оценка по курсу выставляется на основе оценки за промежуточную аттестацию. Возможен случай, когда в силу значительно отличающейся текущей оценки может быть применен повышающий или понижающий коэффициент

В диплом выставляется оценка за 8 семестр.

**Примечание:** Оценочные материалы по дисциплине приведены в фонде оценочных материалов ОПОП.

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **5.1 Печатные и электронные издания:**

1. Крюков, А. П. Введение в изучение явлений на поверхности конденсированных сред : учебное пособие по курсу "Процессы на поверхности раздела фаз" по направлению "Нанотехнологии", и слушателей ФПКПС / А. П. Крюков, И. Н. Шишкова, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Издательский дом МЭИ, 2009 . – 80 с. - ISBN 978-5-383-00384-8 . <http://elibr.mpei.ru/elibr/view.php?id=896>;
2. Введение в физику поверхности / К. Оура, и др., Рос.акад. наук, Дальневост. отд-ние, ин-т автоматизации и процессов управления . – М. : Наука, 2006 . – 490 с. - ISBN 5-02-034355-2 .;
3. Крюков, А. П. Элементы физической кинетики : Учебное пособие по курсу "Основы криофизики" / А. П. Крюков, Моск. энерг. ин-т (МЭИ) . – М. : Изд-во МЭИ, 1995 . – 69 с. : 890.00 .;
4. Крюков, А. П. Элементы гидродинамики и теплопереноса в гелии II : Учебное пособие по курсу "Криофизика" по направлению "Техническая физика" / А. П. Крюков, Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ) . – М. : Изд-во МЭИ, 2004 . – 80 с. - ISBN 5-7046-1137-0 .;
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.- "Гидродинамика" Т. 6, (6-е изд., испр.), Издательство: "ФИЗМАТЛИТ", Москва, 2021 - (728 с.) <https://e.lanbook.com/book/185671>.

## 5.2 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

1. Office / Российский пакет офисных программ;
2. Windows / Операционная система семейства Linux.

## 5.3 Интернет-ресурсы, включая профессиональные базы данных и информационно-справочные системы:

1. ЭБС Лань - <https://e.lanbook.com/>
2. Научная электронная библиотека - <https://elibrary.ru/>
3. База данных журналов издательства Elsevier - <https://www.sciencedirect.com/>
4. Электронные ресурсы издательства Springer - <https://link.springer.com/>
5. База данных Web of Science - <http://webofscience.com/>
6. База данных Scopus - <http://www.scopus.com>
7. Национальная электронная библиотека - <https://rusneb.ru/>
8. ЭБС "Консультант студента" - <http://www.studentlibrary.ru/>
9. Электронная библиотека МЭИ (ЭБ МЭИ) - <http://elib.mpei.ru/login.php>
10. Портал открытых данных Российской Федерации - <https://data.gov.ru>
11. База открытых данных Росфинмониторинга - <http://www.fedsfm.ru/opendata>
12. Электронная открытая база данных "Polpred.com Обзор СМИ" - <https://www.polpred.com>
13. Национальный портал онлайн обучения «Открытое образование» - <https://openedu.ru>
14. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии - <http://protect.gost.ru/>
15. Открытая университетская информационная система «РОССИЯ» - <https://uisrussia.msu.ru>

## 6. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Тип помещения	Номер аудитории, наименование	Оснащение
Учебные аудитории для проведения лекционных занятий и текущего контроля	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения практических занятий, КР и КП	М-409/2, Аудитория каф. "НТ"	стол преподавателя, стол, доска меловая, мультимедийный проектор
	М-422/4, Учебная лаборатория криофизики	стол, стул, мультимедийный проектор
	М-412, Учебная аудитория	стеллаж для хранения книг, стол, стул, мультимедийный проектор, доска маркерная
	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер
Учебные аудитории для проведения промежуточной аттестации	Ж-120, Машинный зал ИВЦ	сервер, кондиционер

Помещения для самостоятельной работы	М-411/1, Компьютерный класс	стол, стул, доска меловая, мультимедийный проектор, компьютер персональный
Помещения для консультирования	М-423/1, Аудитория каф. "ИТ"	стул, стол письменный
Помещения для хранения оборудования и учебного инвентаря	М-407/1, Кладовая	стеллаж для хранения инвентаря, стеллаж для хранения книг, инвентарь специализированный

## БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВАЯ СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

## Процессы на поверхности раздела фаз

(название дисциплины)

## 8 семестр

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

КМ-1 Основные понятия и методы анализа поверхности (Перекрестный опрос)

КМ-2 Приборы и методы анализа поверхности (Перекрестный опрос)

КМ-3 Основные характеристики процессов адсорбции и десорбции (Перекрестный опрос)

КМ-4 Процессы на границе раздела фаз (Контрольная работа)

**Вид промежуточной аттестации – Экзамен.**

Номер раздела	Раздел дисциплины	Индекс КМ:	КМ-1	КМ-2	КМ-3	КМ-4
		Неделя КМ:	4	8	12	16
1	Поверхность: основные понятия и методы анализа					
1.1	Определение понятия поверхности			+		+
1.2	Понятия и уравнения вакуумной техники		+		+	
1.3	Методы анализа поверхности			+		+
2	Адсорбция и десорбция					
2.1	Основные определения				+	
2.2	Кинетика адсорбции, скорость адсорбции				+	
2.3	Анализ экспериментальных данных по криовакуумной откачке гелия		+		+	
2.4	Термическая десорбция				+	
3	Моделирование взаимодействий атомов газа с поверхностью твердого тела					
3.1	Модели взаимодействий		+		+	
3.2	Численное моделирование взаимодействия атома газа с блоком атомов твердого тела			+	+	+
4	Процессы переноса на межфазной поверхности гелия II					
4.1	Отражение звука от межфазной поверхности сверхтекучего гелия			+	+	+
4.2	Движение He-II в капилляре с паром при наличии продольного теплового потока				+	

	Бec KM, %:	20	20	20	40
--	------------	----	----	----	----