

ИНСТИТУТ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, СПИНТРОНИКЕ И ФОТОНИКЕ  
КАФЕДРА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ОДОБРЕНО НТС ИНТЭЛ

Протокол № 2

от 26.04.2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**ИЗБРАННЫЕ ГЛАВЫ ФИЗИКИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.03.01 Прикладные математика и физика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
8	2	72	12	12	0		21	0	Э
Итого	2	72	12	12	0	0	21	0	

## **АННОТАЦИЯ**

Целями освоения учебной дисциплины является: ознакомление студентов с принципиальными вопросами, лежащими в основе молекулярно-кинетических методов разделения изотопов (газовая диффузия, центрифугирование, метод разделительного сопла), а также начальными сведениями из теории разделения изотопных смесей в каскадах.

Поскольку проблемы умножения разделения, вызванного первичным (элементарным) эффектом в многоступенчатых установках имеют большое сходство, теория каскадов представляется в виде общих закономерностей молекулярно-селективного переноса без анализа физики (физико-химии) первичного процесса и гидродинамических режимов работы аппаратов каскада.

Особое внимание уделяется методу газовой центрифуги, являющимся ведущим в мире промышленным методом получения обогащенного урана. Лекционный материал отражает как классическую теорию, описывающую течение и разделение бинарной смеси изотопов урана в центробежном аппарате, так и анализ современного состояния исследований по разделению изотопов неурановых элементов.

### **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Целями освоения учебной дисциплины является: ознакомление студентов с принципиальными вопросами, лежащими в основе молекулярно-кинетических методов разделения изотопов (газовая диффузия, центрифугирование, метод разделительного сопла), а также начальными сведениями из теории разделения изотопных смесей в каскадах.

Поскольку проблемы умножения разделения, вызванного первичным (элементарным) эффектом в многоступенчатых установках имеют большое сходство, теория каскадов представляется в виде общих закономерностей молекулярно-селективного переноса без анализа физики (физико-химии) первичного процесса и гидродинамических режимов работы аппаратов каскада.

Особое внимание уделяется методу газовой центрифуги, являющимся ведущим в мире промышленным методом получения обогащенного урана. Лекционный материал отражает как классическую теорию, описывающую течение и разделение бинарной смеси изотопов урана в центробежном аппарате, так и анализ современного состояния исследований по разделению изотопов неурановых элементов.

### **2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО**

Изучение дисциплины сопутствует научно-исследовательской практике студентов. Целью которой является проработка теоретических вопросов в рамках выбранного профиля подготовки, участие в научных исследованиях, школах, семинарах и конференциях, овладение производственными навыками и передовыми методами по специальности, приобретение практического опыта и навыков научной и производственной работы. Успешное освоение дисциплины возможно только после освоения студентами таких дисциплин как математический анализ, общая физика, обыкновенные дифференциальные уравнения, интегральные уравнения, численные методы.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
Участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации	Природные и социальные явления и процессы	ПК-3.1 [1] - Способен применять физико-теоретические концепции, аналитические методы, методы обработки экспериментальных данных в области физики кинетических явлений  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011, 40.044, 40.104	З-ПК-3.1[1] - Знать физико-теоретические концепции, аналитические методы, методы обработки экспериментальных данных в области физики кинетических явлений; У-ПК-3.1[1] - Уметь применять физико-теоретические концепции, аналитические методы, методы обработки экспериментальных данных в области физики кинетических явлений; В-ПК-3.1[1] - Владеть аналитическими методами, методами обработки экспериментальных данных в области физики кинетических явлений
Участие в проведении теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в	Природные и социальные явления и процессы	ПК-3.2 [1] - Способен применять методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области физики кинетических	З-ПК-3.2[1] - Знать методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области

<p>проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации</p>		<p>явлений</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011, 40.044, 40.104</p>	<p>физики кинетических явлений; У-ПК-3.2[1] - Уметь применять методы математической и теоретической физики, методы математического и компьютерного моделирования процессов в области физики кинетических явлений; В-ПК-3.2[1] - Владеть методами математической и теоретической физики, методами математического и компьютерного моделирования процессов в области физики кинетических явлений</p>
--	--	---	--

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
<p>Профессиональное воспитание</p>	<p>Создание условий, обеспечивающих, формирование чувства личной ответственности за научно-технологическое развитие России, за результаты исследований и их последствия (В17)</p>	<p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования чувства личной ответственности за достижение лидерства России в ведущих научно-технических секторах и фундаментальных исследованиях, обеспечивающих ее экономическое развитие и внешнюю безопасность, посредством контекстного обучения, обсуждения социальной и практической значимости результатов научных исследований и технологических разработок. 2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для формирования</p>

		<p>социальной ответственности ученого за результаты исследований и их последствия, развития исследовательских качеств посредством выполнения учебно-исследовательских заданий, ориентированных на изучение и проверку научных фактов, критический анализ публикаций в профессиональной области, вовлечения в реальные междисциплинарные научно-исследовательские проекты.</p>
<p>Профессиональное воспитание</p>	<p>Создание условий, обеспечивающих, формирование научного мировоззрения, культуры поиска нестандартных научно-технических/практических решений, критического отношения к исследованиям лженаучного толка (В19)</p>	<p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин/практик «Научно-исследовательская работа», «Проектная практика», «Научный семинар» для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования понимания основных принципов и способов научного познания мира, развития исследовательских качеств студентов посредством их вовлечения в исследовательские проекты по областям научных исследований.</li> </ul> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин "История науки и инженерии", "Критическое мышление и основы научной коммуникации", "Введение в специальность", "Научно-исследовательская работа", "Научный семинар" для:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- формирования способности отделять настоящие научные исследования от лженаучных посредством проведения со студентами занятий и регулярных бесед;</li> <li>- формирования критического мышления, умения рассматривать различные исследования с экспертной позиции посредством обсуждения со студентами современных исследований,</li> </ul>

		исторических предпосылок появления тех или иных открытий и теорий.
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование творческого инженерного/профессионального мышления, навыков организации коллективной проектной деятельности (B22)	<p>1.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для развития навыков коммуникации, командной работы и лидерства, творческого инженерного мышления, стремления следовать в профессиональной деятельности нормам поведения, обеспечивающим нравственный характер трудовой деятельности и неслужебного поведения, ответственности за принятые решения через подготовку групповых курсовых работ и практических заданий, решение кейсов, прохождение практик и подготовку ВКР.</p> <p>2.Использование воспитательного потенциала дисциплин профессионального модуля для: - формирования производственного коллективизма в ходе совместного решения как модельных, так и практических задач, а также путем подкрепление рационально-технологических навыков взаимодействия в проектной деятельности эмоциональным эффектом успешного взаимодействия, ощущением роста общей эффективности при распределении проектных задач в соответствии с сильными компетентностными и эмоциональными свойствами членов проектной группы.</p>
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности и аккуратности в работе с опасными веществами и при требованиях к нормам высокого класса чистоты (B35)	<p>1.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин «Введение в специальность», «Введение в технику физического эксперимента», «Измерения в микро- и нанoeлектронике»,</p>

		<p>«Информационные технологии в физических исследованиях», «Экспериментальная учебно-исследовательская работа» для:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- формирования навыков безусловного выполнения всех норм безопасности на рабочем месте, соблюдении мер предосторожности при выполнении исследовательских и производственных задач с опасными веществами и на оборудовании полупроводниковой промышленности, а также в помещениях с высоким классом чистоты посредством привлечения действующих специалистов полупроводниковой промышленности к реализации учебных дисциплин и сопровождению проводимых у студентов практических работ в этих организациях, через выполнение студентами практических и лабораторных работ, в том числе с использованием современных САПРов для моделирования компонентной базы электроники, измерительного и технологического оборудования на кафедрах, лабораториях и центрах ИНТЭЛ; 2.Использование воспитательного потенциала профильных дисциплин «Спецпрактикум по физике наносистем», «Спецпрактикум по нанотехнологиям», «Специальный практикум по физике наносистем», «Современные проблемы физики конденсированных сред (спецсеминар)», «Экспериментальные методы исследования наноструктур (спецсеминар)», для: - формирования профессиональной коммуникации в научной среде;</li></ul>
--	--	--



	<i>8 Семестр</i>						
1	Первый раздел	1-8	8/8/0		25	КИ-8	З-ПК-3.1, У-ПК-3.1, В-ПК-3.1, З-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2
2	Второй раздел	9-12	4/4/0		25	КИ-12	З-ПК-3.1, У-ПК-3.1, В-ПК-3.1, З-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2
	<i>Итого за 8 Семестр</i>		12/12/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 8 Семестр</b>				50	Э	З-ПК-3.1, У-ПК-3.1, В-ПК-3.1, З-ПК-3.2, У-ПК-3.2, В-ПК-3.2

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>8 Семестр</i>	12	12	0
<b>1-8</b>	<b>Первый раздел</b>	8	8	0
1 - 4	<b>Физические основы разделения бинарной смеси изотопов методом газовой диффузии</b> Физические основы разделения бинарной смеси изотопов методом газовой диффузии	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
4 - 8	<b>Физические основы разделения изотопов методом газовой центрифуги - часть 1</b> Физические основы разделения изотопов методом газовой центрифуги - часть 1	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
<b>9-12</b>	<b>Второй раздел</b>	4	4	0
9 - 12	<b>Физические основы разделения изотопов методом газовой центрифуги - часть 2</b> Физические основы разделения изотопов методом газовой центрифуги - часть 2	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

### ТЕМЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>8 Семестр</i>
1 - 4	<b>Освоение навыков оценки элементарных эффектов</b>

	<b>разделения</b> Освоение навыков оценки элементарных эффектов разделения. Оценка разделительной мощности разделительного элемента.
5 - 8	<b>Практические занятия</b> Практические занятия
9 - 12	<b>Практические занятия - часть 2</b> Практические занятия - часть 2

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Чтение лекций, проведение практических занятий с максимальным вовлечением всех студентов группы.

## 7. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-3.1	З-ПК-3.1	Э, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-3.1	Э, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-3.1	Э, КИ-8, КИ-12
ПК-3.2	З-ПК-3.2	Э, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-3.2	Э, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-3.2	Э, КИ-8, КИ-12

## Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической

			литературы.
85-89	4 – «хорошо»	В	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		С	
70-74		Д	
65-69	3 – «удовлетворительно»	Е	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	Ф	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ Б 86 Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах : , Москва: Физматлит, 2017
2. ЭИ Б 825 Физические основы разделения изотопов в газовой центрифуге : Рекомендовано УМО "Ядерные физика и технологии" в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению "Ядерные физика и технологии" и специальности "Физика кинетических явлений", Москва: МЭИ, 2017
3. ЭИ Т33 Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей : учебное пособие для вузов, ред. В. Д. Борман, Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

## **9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

При изучении дисциплины необходимо твердо усвоить основные закономерности и методики расчета изотопо-селективного переноса компонентов как в одиночном разделительном аппарате (в ГД-ступени, в газовой центрифуге), так и в многоступенчатой установке (каскаде). Надлежит иметь четкое представление об:

- Основных характеристиках разделительной ступени;
- Способах умножения первичного (элементарного) эффекта разделения;
- Схемах разделительных каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных смесей;
- Основах теории систем дифференциальных и разностных уравнений;
- Современных методах оптимизации целевых функций многих переменных.

Опираясь на уравнения переноса (в отдельном аппарате и в каскаде), нужно уметь составить программу и провести оптимизационный расчет прямоугольно-секционированного каскада для разделения бинарных смесей.

Следует овладеть современными эффективными методами «поверочного» расчета прямоугольного и прямоугольно-секционированного каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей.

При изучении метода газовой центрифуги особое внимание следует уделить следующим вопросам:

- Умножение первичного эффекта в противоточном течении. Принцип суперпозиции;
- Анализ гидродинамических течений в газовой центрифуге;
- Диффузия в бинарной смеси в центробежном поле сил;

Необходимо иметь общее представление о численных методах решения гидродинамических уравнений в ГЦ. Нужно уметь проводить оценочный расчет гидродинамических и разделительных характеристик длинной ГЦ (поле скоростей, коэффициент разделения, разделительная способность, коэффициент полезного действия) для случаев разделения бинарной и многокомпонентной смесей.

Надо иметь представление об инженерно-экономических аспектах центробежного разделения и о прогрессе центробежной технологии.

Для освоения курса рекомендуются следующие основные учебные материалы:

1. Сулаберидзе Г.А., Палкин В.А., Борисевич В.Д., Борман В.Д., Тихомиров А.В. Теория разделения каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей.

Под ред. В.Д. Бормана. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

2. В.М. Жданов. Тайны разделения изотопов. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

## **11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

При изучении дисциплины необходимо твердо усвоить основные закономерности и методики расчета изотопо-селективного переноса компонентов как в одиночном разделительном аппарате (в ГД-ступени, в газовой центрифуге), так и в многоступенчатой установке (каскаде). Надлежит иметь четкое представление об:

- Основных характеристиках разделительной ступени;
- Способах умножения первичного (элементарного) эффекта разделения;
- Схемах разделительных каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных смесей;
- Основах теории систем дифференциальных и разностных уравнений;
- Современных методах оптимизации целевых функций многих переменных.

Опираясь на уравнения переноса (в отдельном аппарате и в каскаде), нужно уметь составить программу и провести оптимизационный расчет прямоугольно-секционированного каскада для разделения бинарных смесей.

Следует овладеть современными эффективными методами «поверочного» расчета прямоугольного и прямоугольно-секционированного каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей.

При изучении метода газовой центрифуги особое внимание следует уделить следующим вопросам:

- Умножение первичного эффекта в противоточном течении. Принцип суперпозиции;
- Анализ гидродинамических течений в газовой центрифуге;
- Диффузия в бинарной смеси в центробежном поле сил;

Необходимо иметь общее представление о численных методах решения гидродинамических уравнений в ГЦ. Нужно уметь проводить оценочный расчет гидродинамических и разделительных характеристик длинной ГЦ (поле скоростей, коэффициент разделения, разделительная способность, коэффициент полезного действия) для случаев разделения бинарной и многокомпонентной смесей.

Надо иметь представление об инженерно-экономических аспектах центробежного разделения и о прогрессе центробежной технологии.

Для освоения курса рекомендуются следующие основные учебные материалы:

1. Сулаберидзе Г.А., Палкин В.А., Борисевич В.Д., Борман В.Д., Тихомиров А.В. Теория разделения каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей.

Под ред. В.Д. Бормана. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

2. В.М. Жданов. Тайны разделения изотопов. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.

Автор(ы):

Сулаберидзе Георгий Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент

Смирнов Андрей Юрьевич

Рецензент(ы):

Борисевич В.Д.