

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 01/08-577

от 28.08.2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ФИЗИКА РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Направление подготовки
(специальность)

[1] 16.03.01 Техническая физика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки, час.	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экз./зач./КР/КП
7	4	144	48	32	0		28	0	Э
Итого	4	144	48	32	0	0	28	0	

АННОТАЦИЯ

Целями освоения учебной дисциплины являются знакомство с термодиффузионным, масс-диффузионным и хроматографическим методами разделения смесей. Изучается физическая сущность явлений, лежащих в основе этих разделительных процессов, выводятся уравнения, описывающие элементарный эффект разделения и умножение элементарного эффекта разделения за счёт организации циркуляционного течения. Вводятся основные параметры, характеризующие эффективность процесса разделения. Приводятся примеры реализации разделительного процесса в аппаратах колонного типа.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины являются знакомство с термодиффузионным, масс-диффузионным и хроматографическим методами разделения смесей. Изучается физическая сущность явлений, лежащих в основе этих разделительных процессов, выводятся уравнения, описывающие элементарный эффект разделения и умножение элементарного эффекта разделения за счёт организации циркуляционного течения. Вводятся основные параметры, характеризующие эффективность процесса разделения. Приводятся примеры реализации разделительного процесса в аппаратах колонного типа.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Изучение данной дисциплины предшествует научно-исследовательской практике, 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. Для успешного освоения дисциплины необходим предшествующий математический и естественнонаучный цикл, включающий следующие дисциплины: математика, физика, химия, а также введение в ядерную физику, атомная физика, теоретическая физика: механика сплошных сред (гидродинамика), газодинамика.

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	Код и наименование индикатора достижения профессиональной
--	---------------------------	---	---

		(профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	компетенции
научно-исследовательский			
Применение эффективных методов исследования физико-технических объектов, процессов и материалов. Проведение стандартных и сертификационных испытаний технологических процессов и изделий с использованием современных аналитических средств технической физики.	Наноразмерные системы, атомно-молекулярные смеси, масс-спектрометрия и спектрометрия ионной подвижности, композиционные материалы.	ПК-1 [1] - Способен применять эффективные методы исследования физико-технических объектов, процессов и материалов, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов и изделий с использованием современных аналитических средств технической физики <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011, 40.167	З-ПК-1[1] - Знать эффективные методы исследования физико-технических объектов, процессов и материалов, современные аналитические средства технической физики ; У-ПК-1[1] - Уметь проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов и изделий с использованием современных аналитических средств технической физики ; В-ПК-1[1] - Владеть эффективными методами исследования физико-технических объектов, процессов и материалов, современными аналитическими средствами технической физики испытаний технологических процессов и изделий

4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)
Профессиональное воспитание	Создание условий, обеспечивающих, формирование ответственности за профессиональный выбор, профессиональное развитие и профессиональные решения (B18)

5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>7 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-10	30/20/0		25	Зд-10	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1
2	Часть 2	11-16	18/12/0		25	ДЗ-16	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		48/32/0		50		
	Контрольные мероприятия за 7 Семестр				50	Э	З-ПК-1, У-ПК-1, В-ПК-1

* – 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
ДЗ	Домашнее задание
Зд	Задание (задача)
Э	Экзамен

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>7 Семестр</i>	48	32	0
1-10	Часть 1	30	20	0
1 - 5	Физическая сущность явлений, лежащих в основе хроматографического процесса Физическая сущность явлений, лежащих в основе хроматографического процесса. Ионно-обменная хроматография. Адсорбенты. Типы ионно-обменных хроматограмм. Статика и динамика ионного обмена. Построение первичных ионно-обменных хроматограмм. Хроматографическое разделение редкоземельных элементов. Хроматографическая колонна. Зависимость степени разделения от различных параметров процесса. Аппаратура, применяемая для хроматографии Методы	Всего аудиторных часов		
		15	10	0
		Онлайн		
		0	0	0

	анализа разделяемых веществ. Хроматограф. Непрерывная хроматография. Разделение в движущейся зоне. Теория неравновесного процесса разделения бинарной смеси. Нестационарная задача. Время релаксации. Коэффициент разделения. Иллюстрация применения теории на примере разделения изотопов азота. Создание циркуляции за счет изменения направления межфазового переноса. Двухтемпературная схема ионно-обменного процесса. Влияние состава раствора на селективность ионита.			
6 - 10	Сущность явления термодиффузия. Сущность явления термодиффузия. Термодиффузия в газах. Термодиффузионная постоянная. Элементарный эффект разделения. Экспериментальные методы определения термодиффузионной постоянной. Время установления стационарного эффекта разделения при отсутствии конвекции. Умножение элементарного эффекта разделения. Термодиффузионные колонны. Вывод уравнения переноса. Безотборный режим работы колонны. Работа колонны с отбором. Фактор разделения колонны, его зависимость от отбора. Время установления равновесия в колоннах. Вопросы оптимизации работы термодиффузионных колонн. Каскадирование термодиффузионных колонн. Вопросы эффективности каскада. Прямоугольно-ступенчатый каскад. Каскады с постоянным и переменным коэффициентами ступенчатости. Оптимизация прямоугольно-ступенчатого каскада. Секция исчерпывания. Термодиффузионные процессы разделения в жидкостях. Феноменологическая теория термодиффузионной постоянной. Жидкостная разделительная колонна. Термодинамический КПД при термодиффузии. Минимальные затраты разделения. Функция стоимости.	Всего аудиторных часов		
		15	10	0
		Онлайн		
		0	0	0
11-16	Часть 2	18	12	0
11 - 16	Краткое описание процесса разделения с помощью масс-диффузионных разделительных насосов и ступеней. Краткое описание процесса разделения с помощью масс-диффузионных разделительных насосов и ступеней. Диффузия в струю пара. Вывод уравнения переноса. Коэффициент разделения. Разделение изотопов легких элементов методом диффузии в парах. Принципиальная схема усовершенствованного разделительного насоса. Разделительные ступени большой производительности. Каскадирование разделительных насосов и ступеней. Диффузия в противотоке. Элементарный коэффициент разделения. Умножение элементарного эффекта в масс-диффузионных колоннах. Вывод уравнения переноса для изотопической смеси. Расчет элементарного эффекта разделения. Теория масс-диффузионной колонны. Способы создания циркуляции в колоннах. Использование диафрагмы. Выбор рабочей жидкости. Борьба с паразитными эффектами в реальных колоннах. Ртутные	Всего аудиторных часов		
		18	12	0
		Онлайн		
		0	0	0

	масс-диффузионные колонны. Каскадирование масс-диффузионных колонн. Преимущества колонн по сравнению с каскадом из одиночных ступеней. Примеры разделения изотопических смесей методом масс-диффузии. Опыты Майера, Кучерова, Гвердцители, МИФИ. Опыт эксплуатации ртутных масс-диффузионных колонн.			
--	--	--	--	--

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>7 Семестр</i>
1 - 4	<p>Хроматографический метод разделения смесей</p> <p>Виды хроматографических процессов, применяемых для анализа и разделения смесей и место и роль ионно-обменной хроматографии, которой в курсе уделяется особое внимание.</p> <p>Работа ионно-обменной хроматографической колонны. Статика и динамика ионного обмена. Зависимости степени разделения колонны от основных параметров разделительного процесса. Непрерывная хроматография, применяемой для разделения изотопов легких химических элементов. Вывод уравнений, описывающих процесс разделения в движущейся зоне. Теория неравновесного процесса разделения бинарной изотопной смеси. Нестационарный процесс в ионно-обменной хроматографии. Время релаксации и коэффициент разделения. Применении теории на примере разделения изотопов азота ионно-обменной хроматографией. Создание циркуляции за счет изменения направления межфазового переноса.</p>
5 - 10	<p>Разделение смесей термической диффузией</p> <p>Роль термодиффузионной постоянной и величина первичного (элементарного) эффекта разделения. Экспериментальные и теоретические методы определения термодиффузионной постоянной. Вывод выражения для времени установления стационарного эффекта разделения при отсутствии конвекции. Механизм умножения элементарного эффекта разделения. Преимущества и недостатки разных видов термодиффузионных колонн. Вывод уравнения переноса в одиночной термодиффузионной колонне (ТДК). Особенности работы ТДК в безотборном режиме работы и режиме работы с отбором. Основные критериальные параметры процесса разделения в ТДК. Современные подходы к проблеме оптимизации работы термодиффузионных колонн, каскадированию ТДК и оптимизации работы каскада из ТДК. Прямоугольно-ступенчатый каскад (ПСК), каскады с постоянным и переменным коэффициентами ступенчатости. Оптимизация ПСК. Роль секции исчерпывания в каскаде.</p>

11 - 16	<p>Разделение смесей масс-диффузией</p> <p>Физические процессы, лежащие в основе процесса разделения с помощью масс-диффузионных разделительных насосов и ступеней. Процесс диффузии разделяемой смеси в струю пара. Вывод уравнения переноса и выражения для коэффициента разделения. Разделение изотопов легких элементов методом диффузии в парах. Принципиальная схема усовершенствованного разделительного масс-диффузионного насоса. Разделительные ступени большой производительности. Процесс каскадирования разделительных насосов и ступеней и особенности процесса диффузии в противотоке. Причины возникновения элементарного (первичного) эффект разделения и процесс его умножения в масс-диффузионных колоннах. Уравнение переноса для изотопической смеси. Величина элементарного эффекта разделения. Способы создания циркуляционного течения в разделительных колоннах и причины ввода диафрагмы в колонну. Способы борьбы с паразитными эффектами в реальных масс-диффузионных колоннах. Каскадирование масс-диффузионных колонн и преимущества колонн по сравнению с каскадом из одиночных ступеней. Примеры разделения изотопических смесей методом масс-диффузии. Опыты Майера, Кучерова, Гвердцители, МИФИ. Основные моменты эксплуатации ртутных масс-диффузионных колонн.</p>
---------	---

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс предусматривает широкое использование в учебном процессе активных форм проведения занятий (компьютерные практикумы, разбор домашних заданий, система контрольно-измерительных материалов, включая тесты) а также, проведение занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков студентов.

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-1	З-ПК-1	Э, Зд-10, ДЗ-16
	У-ПК-1	Э, Зд-10, ДЗ-16
	В-ПК-1	Э, Зд-10, ДЗ-16

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-х балльной шкале	Отметка о зачете	Оценка ECTS
90-100	5 – «отлично»	«зачтено»	A
85-89	4 – «хорошо»		B
75-84			C
70-74			D
65-69	3 – «удовлетворительно»		E
60-64			
ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	«не зачтено»	F

Оценка «отлично» соответствует глубокому и прочному освоению материала программы обучающимся, который последовательно, четко и логически стройно излагает свои ответы, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответах материалы монографической литературы.

Оценка «хорошо» соответствует твердым знаниям материала обучающимся, который грамотно и, по существу, излагает свои ответы, не допуская существенных неточностей.

Оценка «удовлетворительно» соответствует базовому уровню освоения материала обучающимся, при котором освоен основной материал, но не усвоены его детали, в ответах присутствуют неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности.

Отметка «зачтено» соответствует, как минимум, базовому уровню освоения материала программы, при котором обучающийся владеет необходимыми знаниями, умениями и навыками, умеет применять теоретические положения для решения типовых практических задач.

Оценку «неудовлетворительно» / отметку «не зачтено» получает обучающийся, который не знает значительной части материала программы, допускает в ответах существенные ошибки, не выполнил все обязательные задания, предусмотренные программой. Как правило, такие обучающиеся не могут продолжить обучение без дополнительных занятий.

8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ М44 Magnetically Activated and Guided Isotope Separation : , Mazur, Thomas R. , Cham: Springer International Publishing, 2016
2. ЭИ Z62 Separation Hydrometallurgy of Rare Earth Elements : , Zhao, Baodong. , Schreiner, Bryan. , Zhang, Jack. , Cham: Springer International Publishing, 2016
3. 621.039 Ж42 Тайны разделения изотопов : , Жданов В.М., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
4. ЭИ Т33 Теория каскадов для разделения бинарных и многокомпонентных изотопных смесей : учебное пособие для вузов, Палкин В.А. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

5. 533 П64 Физические основы разделения изотопов плазменными методами : учебное пособие для вузов, Борисевич В.Д., Потанин Е.П., Москва: МИФИ, 2008

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

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

<http://library.mephi.ru/>

9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

Курс имеет целью дать базовые знания. При изучении этого курса студенты должны твёрдо усвоить:

- физическую сущность явлений, лежащих в основе хроматографии, термической диффузии и масс-диффузии;
- Основные принципы физико-математического моделирования изучаемых процессов разделения;
- механизм умножения элементарного эффекта разделения
- вывод уравнений селективного массопереноса в одиночном разделительном устройстве и разделительном каскаде.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Курс имеет целью дать базовые знания студентам. При изучении этого курса студенты должны твёрдо усвоить:

- физическую сущность явлений, лежащих в основе хроматографии, термической диффузии и масс-диффузии;
- Основные принципы физико-математического моделирования изучаемых процессов разделения;
- механизм умножения элементарного эффекта разделения
- вывод уравнений селективного массопереноса в одиночном разделительном устройстве и разделительном каскаде.

Автор(ы):

Борисевич Валентин Дмитриевич, д.ф.-м.н.,
профессор