

# БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

Ректор Белорусского  
государственного университета

А.Д.Король

27 июня 2025 г.

Регистрационный № 3198/б.



## ИОНООБМЕННАЯ ХРОМАТОГРАФИЯ

Учебная программа учреждения образования по учебной дисциплине для  
специальности:

**6-05-0531-01 Химия**

Профилизация: Химико-аналитическая и экспертная деятельность

2025 г.

Учебная программа составлена на основе ОСВО 6-05-0531-01-2023, учебного плана № 6-5.5-41/03 от 15.05.2023.

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

*Н.А.Санкевич*, старший преподаватель кафедры аналитической химии химического факультета Белорусского государственного университета

**РЕЦЕНЗЕНТ:**

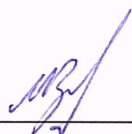
*А.Л.Козлова-Козыревская*, заведующий кафедрой химии и методики преподавания химии факультета естествознания учреждения образования «Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка», кандидат химических наук, доцент

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

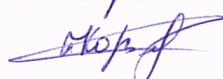
Кафедрой аналитической химии БГУ  
(протокол № 18 от 19.06.2025)

Научно-методическим советом БГУ  
(протокол № 11 от 26.06.2025)

Заведующий кафедрой

  
\_\_\_\_\_

М.Ф.Заяц

*Т. В. Ковалюк-Рабинская*  


## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

### **Цели и задачи учебной дисциплины**

Цель учебной дисциплины – формирование у студентов теоретических знаний и практических навыков, необходимых для анализа ионов с использованием ионообменной хроматографии как одного из ключевых методов аналитической химии.

Задачи учебной дисциплины:

1. Изучение принципов действия ионообменников и механизмов ионообменных процессов.
2. Освоение методик качественного и количественного анализа ионов с применением хроматографических подходов.

**Место учебной дисциплины** в системе подготовки специалиста с высшим образованием.

Учебная дисциплина относится к модулю «Аналитические методы контроля на производстве» компонента учреждения образования.

Связи с другими учебными дисциплинами, включая учебные дисциплины компонента учреждения высшего образования, дисциплины специализации и др.

### **Требования к компетенциям**

Освоение учебной дисциплины «Ионообменная хроматография» должно обеспечить формирование следующих компетенций:

#### ***Универсальные компетенции:***

Владеть основами исследовательской деятельности, осуществлять поиск, анализ и синтез информации;

Решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе применения информационно-коммуникационных технологий

#### ***Базовые профессиональные компетенции:***

Использовать фундаментальные разделы математики (математический анализ, аналитическую геометрию, дифференциальные уравнения, теорию вероятности и математическую статистику) для решения задач специального содержания.

Характеризовать химические явления и процессы на основании законов и физических моделей механики, электричества и магнетизма, оптики, атомной и ядерной физики.

#### ***Специализированные компетенции:***

Выполнять химико-аналитические задачи в испытательных и научно-исследовательских лабораториях предприятий химической, пищевой, добывающей, перерабатывающей промышленности

В результате освоения учебной дисциплины студент должен:

знать: принципы ионного обмена, типы ионообменников, методы элюирования и регистрации ионов.

уметь: проводить анализ катионов и анионов с применением ионообменной хроматографии.

иметь навык: подготовки колонок, проведения анализа и интерпретации хроматографических данных.

### **Структура учебной дисциплины**

Дисциплина изучается в 5 семестре. В соответствии с учебным планом всего на изучение учебной дисциплины «Ионообменная хроматография» отведено для очной формы получения высшего образования – 90 часов, в том числе 36 аудиторных часов, лекции – 14 часов, лабораторные занятия – 12 часов, семинарские занятия – 10 часов. **Из них:**

Лекции – 14 часов, лабораторные занятия – 12 часов, семинарские занятия – 8 часов, управляемая самостоятельная работа (УСР) – 2 часа.

Трудоемкость учебной дисциплины составляет 3 зачетные единицы.

Форма промежуточной аттестации – зачёт.

# **СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА**

## **Раздел 1. Введение в хроматографию и ионный обмен**

### ***Тема 1.1 Введение. Основные понятия. История развития хроматографии.***

Классификация методов хроматографии: по агрегатному состоянию фаз, по природе элементарного акта, по способу относительного перемещения фаз, по аппаратному оформлению.

Перспективы развития хроматографического метода.

## **Раздел 2. Строение и свойства ионообменников**

### ***Тема 2.1 Характеристика ионообменных материалов.***

Природные и синтетические ионообменные сорбенты: структура, свойства, методы получения.

Примеры ионитов: КУ-2, КБ, ЭДЭ-10, АВ-17.

Типы структур: гелевая, макропористая, макросетчатая, волокнистая.

### ***Тема 2.2 Физико-химические свойства ионообменников.***

Ионообменная ёмкость (ПОЕ, ПДОЕ, ДОЕ), кислотно-основные свойства, метод потенциометрического титрования.

Набухаемость и модель Грегора.

## **Раздел 3. Теория и практика процессов ионного обмена**

### ***Тема 3.1 Равновесие ионного обмена.***

Избирательность, коэффициенты распределения и разделения.

Константы обмена, изотермы, теория Грегора.

Влияние факторов: температура, структура, растворитель.

### ***Тема 3.2 Кинетика ионного обмена.***

Внешняя и внутренняя диффузия, методы изучения кинетики: метод тонкого слоя, метод ограниченного объема.

Влияние параметров: радиус иона, структура ионита, температура.

### ***Тема 3.3 Динамика ионного обмена.***

Теория тарелок, построение кривой элюирования, расчет числа тарелок.

Влияние условий: заряд, рН, скорость потока.

Фронтальная хроматография, расчет параметров ДОЕ, ПДОЕ.

## **Раздел 4. Современные направления и аналитические применения**

### ***Тема 4.1 Ионная хроматография.***

Одноколоночные и двухколоночные схемы.

Применение в анализе природных и техногенных объектов.

### ***Тема 4.2 Оценка характеристик ионообменников и колонок.***

Пористость, эффективное сечение, ионное отношение.

Методики определения: набухаемости, плотности, коэффициентов распределения и селективности.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Очная (дневная) форма получения высшего образования с применением дистанционных образовательных технологий  
(ДОТ)

Номер раздела, темы	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Введение в хроматографию и ионный обмен</b>							
1.1	Введение. Основные понятия и классификация хроматографических методов	2		2				Опрос, мини-тесты в аудитории
<b>2</b>	<b>Строение и свойства ионообменников</b>							
2.1	Характеристика природных и синтетических ионообменников	2						Опрос
2.2	Физико-химические свойства ионообменников	2		2				Опрос, мини-тесты в аудитории
<b>3</b>	<b>Теория и практика процессов ионного обмена</b>							
3.1	Равновесие ионного обмена	2			4			Опрос, лабораторный журнал, отчёты, защита результатов
3.2	Кинетика процессов ионного обмена	2		2				Опрос, мини-тесты в аудитории

3.3	Динамика ионообменного хроматографического разделения	2			4			Опрос, лабораторный журнал, отчёты, защита результатов
<b>4</b>	<b>Современные направления и аналитические применения</b>							
4.1	Ионная хроматография: принципы и применение	1		2			2	Опрос, мини-тесты в аудитории, таблица с расчетами
4.2	Параметры колонки и определение характеристик ионообменников	1			4			Опрос, лабораторный журнал, отчёты, защита результатов

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Основная литература

1. Лебухов, В. И. Физико-химические методы исследования : учебник для вузов / В. И. Лебухов, А. И. Окара, Л. П. Павлюченкова ; под редакцией А. И. Окара. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2025. — 480 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/211055>
2. Конюхов, В. Ю. Хроматография : учебник / В. Ю. Конюхов. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 224 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210989>
3. Винарский В.А. Ионный обмен и хроматография на ионитах: учеб. пособие для студентов хим. фак. / В.А. Винарский, А.Н. Трифонова. - Минск: Изд. центр БГУ, 2013. - 117 с.
4. Аналитическая химия. Методы разделения веществ и гибридные методы анализа : Учебное пособие для вузов / А. А. Ганеев, И. Г. Зенкевич, Л. А. Карцова [и др.] ; Под ред. проф Л. Н. Москвина. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 332 с.

### Дополнительная литература

1. Долгоносков, А. М. Колоночная аналитическая хроматография: практика, теория, моделирование : монография / А. М. Долгоносков, О. Б. Рудаков, А. Г. Прудковский. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 468 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/183603>
2. Крылов, В. А. Введение в хроматографические методы анализа. Часть 1. Ионный обмен и ионная хроматография. Часть 2. Практическая ионная хроматография : учебно-методическое пособие / В. А. Крылов, Г. М. Сергеев, Е. В. Елипашева. — Нижний Новгород : ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2010. — 91 с.
3. Бёккер Ю. Хроматография. Инструментальная аналитика: методы хроматографии и капиллярного электрофореза / Ю. Бёккер; пер. с нем. В.С. Куровой; под ред. А. А. Курганова. М.: Техносфера, 2009. — 470 с.
4. Жебентяев А.И. Аналитическая химия. Хроматографические методы анализа: уч. пособие / А.И. Жебентяев. — М. [и др.]: Инфра-М [и др.], 2013. — 205 с.
5. Хенке Х. Жидкостная хроматография: перевод с нем. Н.Е. Киреевой; под ред. А.А. Демина / Х. Хенке. — М.: Техносфера, 2009. — 263 с.
6. Сычев С.Н. Высокоэффективная жидкостная хроматография. Аналитика, физическая химия, распознавание многокомпонентных систем: уч. пособие / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина. — СПб [и др.]: Лань, 2013. — 255 с.
7. Шпигун О.А. Ионная хроматография и ее применение в анализе вод / О.А. Шпигун, Ю.А. Золотов. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 90 с.
8. Кристиан Г. Аналитическая химия. В 2-х т. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019. — 623, 504 с.



## Перечень рекомендуемых средств диагностики и методика формирования итоговой отметки

Формой промежуточной аттестации по дисциплине «Ионообменная хроматография» учебным планом предусмотрен зачет.

Текущий контроль качества усвоения знаний по данной учебной дисциплине может осуществляться с использованием следующих форм диагностики компетенций:

№	Вид контроля	Форма выполнения	Назначение
1	Текущий контроль	Устный опрос, мини-тесты в аудитории	Оценка понимания основных понятий и терминов
2	Выполнение лабораторных работ	Лабораторный журнал, отчёты, защита результатов	Оценка практических навыков работы с колонками, расчетов
3	Управляемая самостоятельная работа	Таблица с расчетами	Развитие самостоятельного анализа, применение теории
4	Итоговая диагностика (зачёт)	Тест	Комплексная оценка освоения дисциплины

### Примерный перечень заданий для управляемой самостоятельной работы

#### **Тема 4.1 Ионная хроматография: принципы и применение. (2 ч)**

Методы расчёта параметров хроматографического пика: времени удерживания, ширины на полувысоте, числа теоретических тарелок.

Задание: На основе заданной хроматограммы рассчитать:

- время удерживания компонентов;
- эффективность колонки (N);
- асимметрию пиков (при необходимости).

Форма контроля – таблица с расчётами.

### Примерная тематика семинарских занятий

#### **Семинар 1. История и классификация методов хроматографии. Введение в ионообменную хроматографию**

Темы для обсуждения и проработки:

- Исторические этапы развития хроматографии, роль М. Цвета.
- Сравнительный анализ классификаций хроматографических методов
- Современные направления и перспективы ионообменной хроматографии.

#### **Семинар 2. Ионообменные материалы и их свойства**

Темы для обсуждения и практической работы:

- Структура и свойства природных и синтетических ионитов (торфы, цеолиты, КУ-2, КБ, АВ-17 и др.).
- Гелевая и макропористая структура, влияние степени сшивки.
- Методы синтеза (полимеризация, поликонденсация), примеры технических условий.

- Понятие и расчёт ионообменной ёмкости (ПОЕ, ДОЕ, ПДОЕ).
- Потенциометрическое титрование,  $pK_a$  и кислотно-основные свойства ионитов.

### ***Семинар 3. Равновесие и кинетика ионного обмена***

Темы для обсуждения:

- Теоретические основы равновесия ионного обмена (константы, коэффициенты, изотермы).
- Влияние температуры, степени сшивки, структуры ионита.
- Внешнедиффузионная и внутридиффузионная кинетика, признаки и расчетные параметры.
- Методы изучения кинетики: метод тонкого слоя, метод ограниченного объема.

### ***Семинар 4. Динамика процесса. Ионная хроматография и практическое применение***

Темы для обсуждения:

- Теория Мартина и Синджа. Уравнение кривой элюирования, расчёт  $N$  и  $H$ .
- Построение кривой фронтальной хроматографии, определение ДОЕ и ПДОЕ.
- Анионная и катионная ИХ: одноколоночная и двухколоночная схемы, особенности применения.
- Применение ИХ для анализа природных вод и аэрозолей.
- Определение параметров колонки и ионообменников (пористость, плотность, набухаемость).

### **Примерный перечень лабораторных занятий**

1. Лабораторная работа 1. Разделение и определение массы ионов меди (II) и цинка методом ионообменной хроматографии
2. Лабораторная работа 2. Определение массы нитратов методом ионообменной хроматографии
3. Лабораторная работа 3. Определение ионов меди (II) методом ионообменной хроматографии

### **Описание инновационных подходов и методов к преподаванию учебной дисциплины**

Изучение учебной дисциплины предусматривает проведение лекционных, лабораторных и семинарских занятий, обеспеченных методическими материалами, специализированным оборудованием и реактивами.

На **лекциях** рассматриваются теоретические основы ионообменной хроматографии, включая механизмы ионного обмена, виды ионообменников, закономерности удерживания и разделения ионов.

**Семинарские занятия** направлены на закрепление теории путём решения расчётных задач, анализа хроматограмм, выбора условий разделения.

В рамках **лабораторного практикума** студенты осваивают методику проведения ионообменного анализа, работу с колонками, подготовку проб, оценку эффективности разделения. Выполняется индивидуальное задание, включающее подбор метода, проведение анализа и интерпретацию результатов.

**Самостоятельная работа** включает изучение литературы, подготовку к лабораторным занятиям и выполнение домашних заданий.

В учебный процесс внедряются **инновационные методы обучения**, включая:

- обучающе-исследовательский подход (разработка методики анализа),
- **эвристический и практико-ориентированный** методы (работа с аналитическими ситуациями, реальными образцами),

Такая организация учебного процесса способствует формированию у студентов профессиональных навыков, развитию аналитического и критического мышления, способности к самостоятельному принятию решений в области ионообменного анализа.

### **Методические рекомендации по организации самостоятельной работы**

Самостоятельная работа студентов является важным компонентом учебного процесса по дисциплине «Ионообменная хроматография» и направлена на углубление теоретических знаний, развитие практических навыков и формирование профессиональных компетенций.

При её организации используются как традиционные источники информации (учебники, пособия, в том числе разработанные преподавателями), так и современные образовательные ресурсы. На образовательном портале размещаются: программа дисциплины; методические материалы к лабораторным и практическим занятиям; задания для подготовки к зачёту; список рекомендованной литературы.

Ряд заданий требует поиска и критического анализа информации, в том числе с использованием профессиональных химических сайтов и баз данных в сети Интернет (например, elibrary.ru, scopus, pubchem, sigmaaldrich и др.).

Задания для управляемой самостоятельной работы (УСР) дифференцируются по уровню подготовки студентов и ориентированы на формирование следующих уровней компетенций:

- Уровень узнавания — освоение и закрепление основных понятий (например, виды ионообменников, принципы ионного обмена).
- Уровень воспроизведения — применение знаний для описания методов, расчётов времени удерживания, анализа хроматограмм.
- Уровень применения — выполнение заданий, предполагающих выбор оптимальных условий анализа, разработку схем разделения и интерпретацию практических результатов.

При этом соблюдается требование к усвоению необходимого и достаточного объёма материала, обеспечивающего как теоретическую подготовку, так и практико-ориентированную направленность.

## Примерный перечень вопросов к зачету

### Тема 1. Введение. Общие классификации

1. Дайте определение хроматографии. В чем суть метода?
2. Охарактеризуйте основные этапы исторического развития хроматографии.
3. Перечислите и охарактеризуйте основные классификации хроматографических методов.
4. Какие типы хроматографии выделяют по агрегатному состоянию фаз?
5. Как различают методы хроматографии по способу относительного перемещения фаз?

### Тема 2. Ионообменные материалы

6. Назовите природные ионообменные сорбенты. Каковы их особенности?
7. Приведите примеры синтетических ионообменников и охарактеризуйте их свойства.
8. Чем отличаются гелевая, макропористая и волокнистая структуры ионитов?
9. Опишите процесс получения ионитов методом поликонденсации (на примере КУ-2, АВ-17 и др.).

### Тема 3. Физико-химические свойства ионитов

10. Что такое полная и динамическая обменная ёмкость? В чём между ними разница?
11. Перечислите факторы, влияющие на обменную ёмкость ионообменников.
12. Как определяется кислотность ионообменников? Применение уравнения Гендерсона–Гассельбаха.
13. Что такое набухаемость ионита? Как она количественно описывается?

### Тема 4. Равновесие ионного обмена

14. Что такое избирательность ионного обмена? Какие коэффициенты её описывают?
15. Объясните взаимосвязь между коэффициентами распределения, разделения и константами обмена.
16. Как структура ионита и природа растворителя влияют на равновесие обмена?

### Тема 5. Кинетика ионного обмена

17. В чем суть внешнEDIффузионного и внутрEDIдиффузионного механизмов обмена?
18. Какие методы применяются для изучения кинетики ионного обмена?
19. Как влияет заряд и радиус иона на кинетику ионного обмена?

### Тема 6. Динамика ионного обмена

20. Приведите уравнение элюирования в теории тарелок Мартина и Синджа.

21. Как рассчитываются число теоретических тарелок и высота эффективной тарелки?

22. Какие факторы влияют на форму и положение кривой элюирования?

23. В чем отличие фронтальной хроматографии от элюентной? Какие параметры определяются из фронтальных кривых?

Тема 7. Ионная хроматография

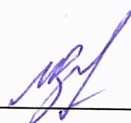
24. Какие виды колонок используются в ионной хроматографии? В чем их особенности?

25. Какие объекты можно анализировать с помощью ионной хроматографии? Примеры анализа природных вод.

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Учебная дисциплина не требует согласования			

Заведующий кафедрой аналитической химии  
доктор химических наук



М.Ф.Заяц

19.06.2025

## ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ УО

Название учебной дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы учреждения высшего образования по учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
Учебная дисциплина не требует согласования			

Заведующий кафедрой аналитической химии  
доктор химических наук

\_\_\_\_\_

М.Ф.Заяц

19.06.2025