

Программа

по дисциплине:

Физические методы исследований

6 семестр

1. Общие проблемы измерений

Методы измерений: отклонений, разностный, нулевой. Стратегии измерений: когерентные и случайные выборки, мультиплексирование. Погрешности аналоговых и цифровых измерительных устройств. Систематические и случайные ошибки. Источники ошибок. Помехи, шумы. Характеристики измерительных систем: чувствительность, порог обнаружения, разрешающая способность, динамический диапазон, нелинейность, полоса пропускания. Статистические и спектральные характеристики случайных величин. Функция распределения случайной величины. Преобразование сигналов. Частотный спектр. Преобразование Фурье.

2. Электрические цепи для передачи импульсных сигналов

Цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами. Импеданс. Описание распространения сигналов в длинных линиях, телеграфные уравнения. Волновые процессы в линии передачи без потерь. Фазовая скорость. Волновое сопротивление. Линия с малыми потерями. Неискажающая линия. Коэффициент отражения. Интерференция падающей и отраженной волн. Согласование линий. Аналог закона Ома для длинных линий. Распространение волн в идеальных линиях и в линиях с потерями, коэффициент затухания и фазовая постоянная. Длинные линии для передачи сигналов различной частоты. Электрические и диэлектрические волноводы.

3. Хроматография

Хроматографическое разделение смеси веществ. Физическая и химическая адсорбция. Адсорбционно-десорбционное равновесие. Изотермы адсорбции. Изотермы Ленгмюра, Генри, полислоистой адсорбции. Кинетика адсорбции-десорбции в потоке газа-носителя. Концепция теоретических тарелок. Закон распределения Нернста. Ширина и форма хроматографического пика. Принципиальное устройство и схема работы хроматографа. Аналитические характеристики хроматографической системы и отдельных её элементов. Набивные и капиллярные хроматографические колонки, их параметры. Оптимальные размеры и разрешение хроматографической колонки. Устройство газового хроматографа. Детекторы. Зависимость вре-

мени удерживания от температуры. Хроматография с программируемым нагревом.

Жидкостная хроматография. Градиентное элюирование. Устройство жидкостного хроматографа. Детекторы в жидкостной хроматографии.

4. Измерение давления и вакуумная техника

Физические границы низкого, высокого и сверхвысокого вакуума. Различные режимы течения газа. Процессы переноса при различных давлениях и температурах: диффузия, эффузия (температурная транспирация), вязкость, теплопроводность. Проводимость элементов вакуумных систем. Методы получения вакуума.

Классификация вакуумных насосов по принципу их действия. Напуск газа в вакуумную камеру. Измерение давления в вакуумных системах. Механические, пьезоэлектрические, тепловые и ионизационные манометры, принципы их действия. Физические ограничения диапазонов применимости различных манометров. Течи в вакуумной системе. Влияние натекания на скорость откачки и предельный вакуум. Методы обнаружения течей. Стационарные и импульсные методы получения высоких давлений. Методы измерения высоких давлений.

5. Масс-спектрометрия

Метод масс-спектрометрического анализа. Единицы измерения массы, применяемые в масс-спектрометрии. Блок-схема масс-спектрометра. Аналитические характеристики масс-спектрометра: точность измерения масс, разрешающая способность, динамический диапазон, порог детектирования, чувствительность. Методы ионизации: ионизация электронным ударом, химическая ионизация, фотоионизация, полевая ионизация, полевая десорбция, бомбардировка быстрыми атомами, матричная лазерная ионизация десорбцией (MALDI), электроспрей. Молекулярные, осколочные, квазимолекулярные ионы. Метастабильные ионы. Методы детектирования ионов. Масс-анализаторы: принципы действия, разрешающая способность. Секторный магнитный масс-анализатор, квадрупольный масс-анализатор, квадрупольные ионные ловушки, времяпролетный масс-анализатор, масс-спектрометр ионно-циклотронного резонанса с преобразованием Фурье. Решение структурных задач методами масс-спектрометрии. Тандемная масс-спектрометрия. Селекция ионов. Методы фрагментации ионов. Комбинации масс-спектрометра с жидкостным и газовым хроматографами. Применения масс-спектрометрии для решения задач биологии, химии, анализа окружающей среды, фармакологии, построения систем безопасности.

7 семестр

6. Оптическая спектроскопия

Поглощение света веществом. Закон Ламберта–Бугера–Бэра. Спектры поглощения, испускания и рассеяния. Радиационное время жизни и истинное время жизни возбужденного состояния. Интенсивность спектральных линий. Форма и ширина спектральной линии. Естественное, доплеровское и столкновительное уширение спектральных линий. Аппаратная ширина линии. Равновесное тепловое излучение. Формула Планка. Яркостная, цветовая и радиационная пирометрия. Источники излучения в различных спектральных диапазонах. Примеры источников равновесного и неравновесного излучения.

Приемники излучения на основе внешнего фотоэффекта. Принцип действия фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Приемники излучения на основе внутреннего фотоэффекта. Шумы и порог чувствительности детекторов электромагнитного излучения. Квантовый выход. Приемники излучения для различных спектральных диапазонов. Классы спектральных приборов: спектрометры, спектрографы, монохроматоры, полихроматоры. Диспергирующие элементы спектральных приборов: призма, дифракционная решетка, интерферометр. Разрешающая способность спектральных приборов.

Спектральные диапазоны и соответствующие им степени свободы в молекулярных системах. Вращательные спектры и микроволновая спектроскопия. Модель жесткого ротатора. Колебательные спектры и инфракрасная спектроскопия. Гармонический и ангармонический осцилляторы. Колебания многоатомных молекул. Колебательно-вращательные переходы в двухатомной молекуле. Электронные переходы и спектроскопия в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Диссоциационный предел спектра. Определение энергии диссоциации. Спектроскопия комбинационного рассеяния. Спектральные методы измерения температуры в неравновесных системах.

7. Лазерная спектроскопия

Когерентное оптическое усиление в активной среде. Пороговая инверсная заселенность уровней. Устройство лазера. Газовые, твердотельные, жидкостные лазеры. Модовый состав лазерного излучения. Перестройка частоты лазерного излучения. Генерация коротких импульсов: методы модуляции добротности и самосинхронизации мод. Преимущества применения лазеров в качестве источников света в спектроскопии. Абсорбционный, внутрирезонаторный, оптико-акустический и флуоресцентный методы лазерной спектроскопии.

8. Измерение температуры

Понятие температуры. Диапазон температур в химической физике. Первичные термометры. Контактные методы измерения температуры (термометры расширения, термометр сопротивления, термомпара). Бесконтактные методы измерения температуры. Равновесное излучение. Формула Планка. Яркостная, цветовая и радиационная пирометрия. Понятие температуры в неравновесных системах на примере плазмы тлеющего разряда. Методы измерения температуры электронов и тяжелых частиц.

9. Радиоспектроскопия

Магнитные моменты электрона, ядер и атомов. ЯМР-активные ядра. Спин в постоянном магнитном поле. Магнитный момент и Ларморова прецессия. Поглощение энергии ВЧ-поля системой ядерных спинов. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса. Химический сдвиг: константа экранирования, единицы измерения, эквивалентные ядра. Спин-спиновое взаимодействие, спектры первого порядка, простые правила интерпретации сверхтонкой структуры. Применение метода ЯМР для исследования структуры молекул. Обменные явления: медленный и быстрый обмен. Принципиальная схема ЯМР-спектрометра. Требования к однородности постоянного магнитного поля; способы минимизации аппаратного уширения линий. Интенсивность и ширина линий спектра ЯМР. Продольная (спин-решеточная) и поперечная (спин-спиновая) релаксация. Основы динамических методов ЯМР: 90° - и 180° -импульсы; фурье-спектроскопия ЯМР.

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса. Сверхтонкая структура спектра ЭПР. Структурные и динамические характеристики вещества, определяемые методами ЭПР. Принципиальная схема ЭПР-спектрометра. Особенности регистрации сигналов ЭПР: волноводы и резонаторы, низкочастотная модуляция поляризирующего магнитного поля, запись спектров в виде производной. Сопоставление частотных диапазонов ЭПР и ЯМР.

Промежуточная и итоговая аттестация по дисциплине Физические методы исследования

Промежуточная аттестация по дисциплине «Физические методы исследований» в **6 семестре** осуществляется в форме дифференцированного зачёта.

Зачёт включает в себя следующие этапы:

- защита домашних заданий и проверка теоретических знаний студента;
- выполнение и сдача лабораторных работ;

- семестровая контрольная работа.

Критерии оценивания знаний, умений и навыков работы по дисциплине «Физические методы исследования»

По результатам защиты заданий текущего контроля за каждое задание и лабораторную работу выставляется оценка по 10-балльной шкале.

При выставлении оценки за устный экзамен учитываются ответы на вопросы экзаменационного билета и решение задачи (задач), а также ответы на уточняющие вопросы по билету и дополнительные вопросы по программе курса.

Оценка **«отлично (10)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания в рамках программы курса и за её пределами, умение решать задачи по физическим методам исследования, умение уверенно делать обоснованный выбор в пользу определенного и/или комбинированного метода исследования при решении сложной нестандартной задачи с проведением всех необходимых оценок.

Оценка **«отлично (9)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания в рамках программы курса, умение решать задачи по физическим методам исследования, умение делать обоснованный выбор в пользу определенного и/или комбинированного метода исследования при решении нестандартной задачи с проведением всех необходимых оценок.

Оценка **«отлично (8)»** выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные глубокие знания в рамках программы курса, умение решать задачи по физическим методам исследования, умение делать выбор в пользу определенного метода исследования с проведением всех необходимых оценок, однако при решении нестандартных задач допустившему некоторые несущественные неточности.

Оценка **«хорошо (7)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердые знания и уверенное понимание материала учебной программы и умение свободно применять теоретические основы физических методов исследования на практике при решении типовых задач, однако при решении нестандартных задач допустил некоторые неточности.

Оценка **«хорошо (6)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание материала учебной программы и умение применять теоретические основы физических методов исследования на практике при решении типовых задач.

Оценка **«хорошо (5)»** выставляется студенту, если он продемонстрировал твердое знание материала учебной программы и умение применять теоретические основы физических методов исследования на практике при решении типовых задач, однако допустил при ответе ряд несущественных неточностей.

Оценка «**удовлетворительно (4)**» выставляется студенту, показавшему владение основными знаниями, необходимыми для правильного подхода к решению типовых задач в объеме программы и продемонстрировавшему общее понимание теоретических основ физических методов исследования, однако демонстрируемые знания имеют разрозненный характер, что не препятствует дальнейшему обучению.

Оценка «**удовлетворительно (3)**» выставляется студенту, показавшему владение основными знаниями, необходимыми для правильного подхода к решению типовых задач в объеме программы, и продемонстрировавшему общее понимание теоретических основ физических методов исследования, однако демонстрируемые знания могут содержать некоторые пробелы и иметь несистемный разрозненный характер, что не препятствует дальнейшему обучению.

Оценки «**неудовлетворительно (2)**» или «**неудовлетворительно (1)**» выставляются студенту, если у него отсутствуют знания базовой составляющей дисциплины, либо допускаются грубые ошибки в изложении материала, либо отсутствует владение терминологией, отсутствует умение находить правильные подходы к решению типовых задач в объеме программы курса.

Процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Порядок проведения защиты заданий текущего контроля

Для допуска к защите задания обучающийся должен решить все задачи из соответствующего задания. Процедура защиты задания проходит в специально отведенное время в форме коллоквиума по темам избранных задач. В процессе пояснения решения задач из задания преподаватель может задавать уточняющие вопросы из соответствующего раздела по программе курса.

Порядок выполнения и защиты лабораторной работы

Для начала выполнения лабораторной работы обучающийся в начале занятия обязан пройти процедуру допуска с обязательной проверкой теоретических основ изучаемого метода исследования и правил техники безопасности. В случае, если обучающийся не продемонстрировал необходимый минимум знаний, то он не допускается к выполнению лабораторной работы, а продолжает теоретическую подготовку к выполнению работы.

Процедура защиты лабораторных работ осуществляется в период лабораторных занятий по расписанию. В процессе защиты лабораторной работы преподаватель может задавать уточняющие вопросы из соответствующего раздела по программе курса.

Порядок проведения семестровой контрольной работы

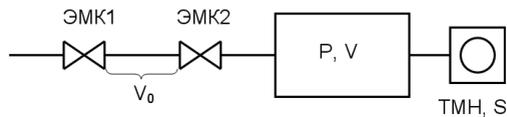
К семестровой контрольной работе допускаются все обучающиеся. Обычно семестровая контрольная работа проводится на зачетной неделе во время, отведенное для лекции согласно расписанию.

Время проведения семестровой контрольной составляет 80 минут. Студентам предлагаются для решения 4–5 оригинальных задач. Темы соответствуют темам семинарских занятий. Задача считается решённой, если она содержит обоснованное решение: ссылки на применяемые физические законы и корректные выкладки, а также промежуточные численные результаты и численный ответ. Разрешается пользоваться любыми записями и учебными пособиями в бумажном виде. Категорически запрещается включать любые устройства, которые могут служить средствами связи – ноутбуки, планшеты, телефоны и т.п. Нарушители удаляются с контрольной работы с оценкой «неудовлетворительно». Разрешается пользоваться калькуляторами (кроме калькуляторов в мобильных телефонах, ноутбуках и т.п.).

Пример семестровой контрольной работы

1. Для измерения большого числа навесок по 1 г взяли аналитические весы, техническая точность которых равна 6 мг. Запишите функцию распределения масс навесок. Какая часть навесок будет отличаться по массе от требуемой более чем на 3 мг?

2. Для проведения кинетических исследований в вакуумную камеру производится импульсный напуск азота. Для этого собрали систему импульсного напуска, которая представлена на рисунке.

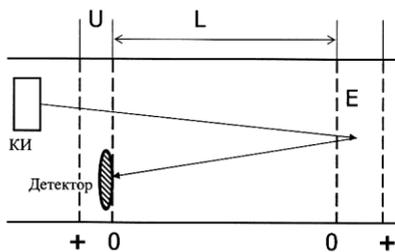


Напуск в вакуумную камеру, объем которой равен $V = 5$ литров и давление в которой поддерживается равным $P = 10^{-6}$ Торр, осуществляется посредством пары электромагнитных клапанов ЭМК1 и ЭМК2. Сначала открывается клапан ЭМК2 (клапан ЭМК1 закрыт) и пространство между клапанами вакуумируется. После чего клапан ЭМК2 закрывается и открывается клапан ЭМК1, через который в пространство между клапанами напускается азот при давлении $P_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ Торр. После этого клапан ЭМК1 закрывают и открывают клапан ЭМК2 для того, чтобы напустить порцию газа в вакуумную камеру. Объем пространства между клапанами $V_0 = 100$ мл. Вакуумная камера откачивается турбомолекулярным насосом (ТМН), объемная скорость откачки которого $S = 70$ л/с. Найдите время,

которое потребуется для того, чтобы турбомолекулярный насос откачал газ, напускаемый за один цикл и вернул систему в исходное состояние.

3. Оцените время удерживания молекул в колонке (радиусом 0.3 мм) газового хроматографа при комнатной температуре, если теплота адсорбции равна: 1) 20 кДж/моль и 2) 60 кДж/моль. Время выхода несорбирующихся компонентов 100 с.

4. Ионы детектируются времяпролетным масс-анализатором с рефлектроном. Ионы ускоряются разностью потенциалов $U = 2$ кВ и периодически вталкиваются в бесполовое пространство порциями с частотой 20 Гц. Напряженность поля рефлектрона составляет $E = 10$ В/см. Длина бесполового пространства $L = 2$ м. Определите, какой диапазон масс можно анализировать данным масс-спектрометром, так чтобы сигналы от ионов одной серии не накладывались на сигнал от ионов другой серии. Минимальная измеряемая масса должна быть 1 Да.



Порядок проведения дифференцированного зачета

К промежуточной аттестации в 6 семестре (дифференцированному зачету) допускаются обучающиеся, успешно (не менее чем на оценку «удовлетворительно (3)») защитившие домашние задания и лабораторные работы. Оценка за дифференцированный зачет учитывает оценку за все домашние задания, лабораторные работы и оценку за семестровую контрольную работу.

Задание

по дисциплине «Физические методы исследований»

1. Общие проблемы измерений, электрические цепи

1.1. Определите минимальную мощность излучения, которую еще можно зарегистрировать с помощью фотоячейки без учета ее собственных шумов. Можно считать, что один фотон выбивает один электрон. Сопротивление резистора $R = 100$ Ом. Паразитная емкость $C = 1$ пФ, длина волны падающего света 500 нм. Фотокатод изготовлен из материала, работа выхода и постоянная Ричардсона для которого равны 0,85 эВ и $1,3$ А/(см²·К²); площадь фотокатода равна 1 см².

1.2. Разряд в газе наблюдается между плоскими электродами и условия эксперимента выбраны так, что каждый атом поверхности катода за время

1 мс с равной вероятностью может испустить любое количество электронов в интервале от 0 до 10. Каждый эмитированный электрон рождает в разрядном промежутке лавину из четырёх электронов. Определите среднее значение анодного тока и среднеквадратическое отклонение значения тока от среднего, если площадь поверхности катода составляет 5 см^2 .

1.3. Для измерения напряжения при комнатной температуре используется усилитель, входное сопротивление и емкость которого равны $R = 1 \text{ МОм}$ и $C = 100 \text{ пФ}$ соответственно. Вследствие микропробоев конденсаторов на входе усилителя имеется импульсный шум, который представляет собой случайные по направлению импульсы тока величиной $I = 100 \text{ нА}$ длительностью $\tau = 10 \text{ мкс}$. Импульсы тока возникают с вероятностью 80% за время 1 мс. Определите среднеквадратические флуктуации напряжения на входе усилителя.

1.4. Стрелочным вольтметром измеряется напряжение $U = 50 \text{ В}$. В техническом описании вольтметра указано: «Максимальная погрешность измерения составляет 4 В». Запишите в явном виде функцию нормального распределения результатов измерения. Какова вероятность получить погрешность отдельного измерения не более $\Delta U = 2 \text{ В}$? Какова вероятность зарегистрировать сигнал ниже $U = 46 \text{ В}$?

1.5. Многократное определение энергии адсорбции молекул дало результаты: 46, 48, 44, 38, 45, 47, 58, 65, 44, 45, 43 кДж/моль. Значения 58 и 65 кДж/моль кажутся в этом ряду неправдоподобно большими. Считая распределение результатов нормальным, определите, следует ли эти величины исключить из статистики как ошибочные, если мы задаемся уровнем значимости 10%.

1.6. Найдите временную зависимость напряжения $U_{\text{вых}}$ в том случае, если $U_{\text{вх}}$ представляет собой прямоугольный сигнал длительности τ . Изобразите эти сигналы в одном масштабе для разных соотношений длительности времени сигнала и характерного времени цепи. Какие электротехнические диагностические устройства могут быть промоделированы такой цепочкой? Какое должно быть соотношение характерных времен, чтобы это измерительное устройство работало с минимальной погрешностью? Приведите возможные параметры L и R , если $U_{\text{вых}}$ регистрируется с помощью осциллографа (см. рис. 1).

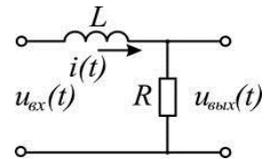


Рис. 1

1.7. На МКС в российском блоке работают два одинаковых источника шума. Если их оба выключить, то уровень шума, создаваемого охлаждающей системой, в определенной точке помещения составит 50 дБ. Если их оба включить, то уровень шума в помещении составит 60 дБ. Чему будет равен уровень шума в помещении, если включить только один источник шума? Какой уровень шума будет от двух источников, если в качестве опорной амплитуды шума взять амплитуду шума охлаждающей системой?

1.8. Экспериментатор регистрирует изменяющийся во времени сигнал величиной ~ 5 В с помощью усилителя, входные сопротивление и емкость которого равны 10 кОм и 0,1 мкФ соответственно, при этом отношение сигнал/шум составляет 60 дБ. Какова необходимая частота выборки, чтобы уровень шума не увеличился при переходе к цифровой регистрации сигнала с помощью 6-битового АЦП?

2. Электрические цепи для передачи импульсных сигналов

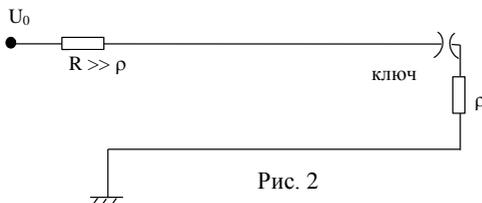
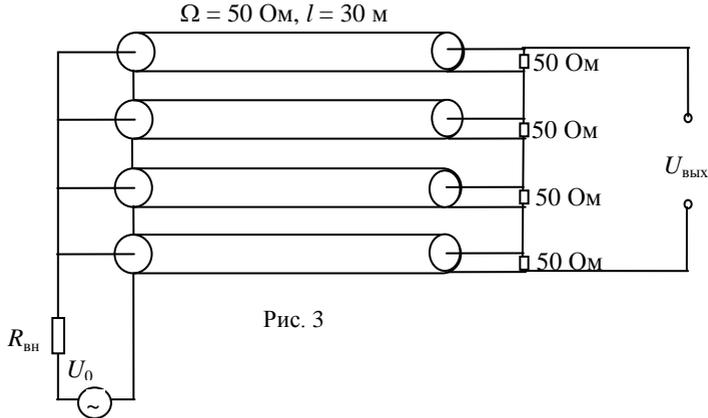


Рис. 2

2.1. Отрезок коаксиального кабеля с волновым сопротивлением Ω длиной l заряжается до напряжения U_0 через большое сопротивление $R \gg \rho, \Omega$. Затем с помощью коммутатора подключается к нагрузке с активным сопротивлением $\rho \neq \Omega$, при этом в нагрузке появится импульс напряжения $U_n(t)$, параметры которого зависят от соотношения ρ и Ω . Изобразите форму импульсов напряжения $U_n(t)$ на активной несогласованной нагрузке при а) $\rho < \Omega$ и б) $\rho > \Omega$. В чем будет их отличие от случая разрядки на согласованную нагрузку (см. рис. 2)?

2.2. Рассчитайте коэффициент затухания электромагнитной волны длиной $\lambda = 3$ см в коаксиальном кабеле. Центральная жила – медь диаметром $d = 0.5$ мм, внешняя медная оплетка имеет диаметр $D = 5$ мм, изоляционный материал – полиэтилен с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2.2$. удельное сопротивление меди $\rho = 1.72 \cdot 10^{-2}$ Ом мм²/м, уткой через изоляции можно пренебречь.

2.3. Предложите схему симметричного разветвителя для трех кабелей с волновым сопротивлением Ω . Какого будет напряжение в каждой из линий после точки разветвления? Как изменится величина активного согласующего сопротивления, если необходимо изготовить симметричный разветвитель для n одинаковых кабелей?



2.4. На рис. 3 приведена схема кабельного трансформатора, в котором используются четыре 30-метровых отрезка коаксиального кабеля с полиэтиленом ($\epsilon = 2.25$) в качестве диэлектрика. Определите $U_{\text{вых}}$, если на вход подается прямоугольный импульс напряжения амплитудой $U_0 = 100 \text{ В}$ и длительностью 20 нс , внутреннее сопротивление генератора $R_{\text{вн}} = 12.5 \text{ Ом}$. Можно ли в этом случае рассматривать каждый кабель как длинную линию?

3. Хроматография

3.1. Оцените время жизни адсорбированной молекулы на поверхности сорбента при комнатной температуре для двух случаев: теплота адсорбции $Q_1 = 20 \text{ кДж/моль}$ и $Q_2 = 100 \text{ кДж/моль}$. Какой из случаев отвечает физической сорбции, а какой – химической?

3.2. На газовом хроматографе с капиллярной колонкой исследуется вещество, взаимодействие которого с сорбентом можно описать с помощью изотермы сорбции Ленгмюра. При концентрации вещества в пробе 10^{22} м^{-3} время выхода исследуемого вещества составляет 90 с . Каким будет время выхода, если концентрацию вещества в пробе увеличить в два раза? Время выхода несорбирующегося компонента составляет 40 с , количество центров сорбции на единицу поверхности составляет 10^{14} см^{-2} , радиус колон-

ки – 0,1 мм. Дополнительные данные: объем пробы составляет 10 мкл, длина колонки – 10 м.

3.3. При расходе газа носителя $Q = 6$ мл/мин в капиллярной колонке длиной $L = 10$ м и диаметром $d = 0,2$ мм число теоретических тарелок для аммиака оказалось равным 200. В этих условиях адсорбция аммиака описывается изотермой Генри с константой $\chi = 0,25$ см. Через какой промежуток времени концентрация аммиака в газовой фазе на тарелке с номером $N = 50$ достигает своего максимального значения, если объем вводимой пробы равен 1 мкл? Чему равно это значение (в моль/л)?

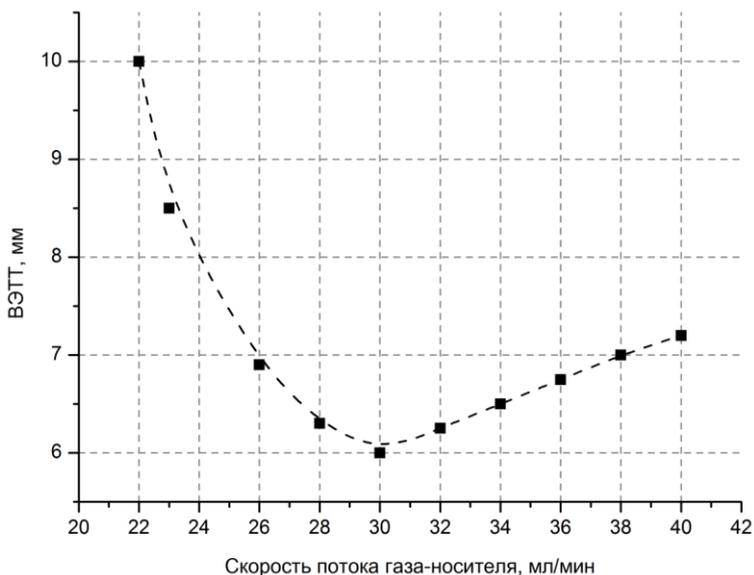


Рис. 4

3.4. В одной из статей журнала «Journal of Chromatography» приведена зависимость ВЭТТ от скорости потока газа-носителя, описываемая уравнением Ван–Деемтера (см. рис. 4). Определите тип используемой авторами статьи колонки, если известно, что коэффициенты продольной и поперечной диффузий молекул (ксилола) в газе-носителе равны и составляют $D = 0,2$ см²/с. Во сколько раз изменилась бы разрешающая способность хроматографа при уменьшении скорости потока газа-носителя с 80 до 60 мл/мин?

3.5. Для разделения изомеров C_8H_{18} используется капиллярная хроматографическая колонка длиной 10 м, на внутреннюю поверхность которой

нанесен слой жидкой неподвижной фазы (НФ) толщиной 0,1 мкм, через колонку при комнатной температуре продувается газ-носитель со скоростью 2 мл/мин. Коэффициенты диффузии изомеров одинаковы и составляют 10^{-5} см²/с и 0,1 см²/с в НФ и газовой фазе соответственно. Определите различие времен выхода изомеров из колонки, если теплоты их растворения в НФ равны 15,47 кДж/моль и 15,72 кДж/моль.

3.6. На рис. 5 приведена гель-проникающая хроматограмма монодисперсного полимерного стандарта. Определите коэффициент диффузии полимера в растворителе. Расход элюента $\rho = 1$ мл/мин, внутренний диаметр колонки $d = 7,8$ мм, объем закола $V = 20$ мкл. Длина колонки равна 15 см, диаметр гранул носителя – 39 мкм.

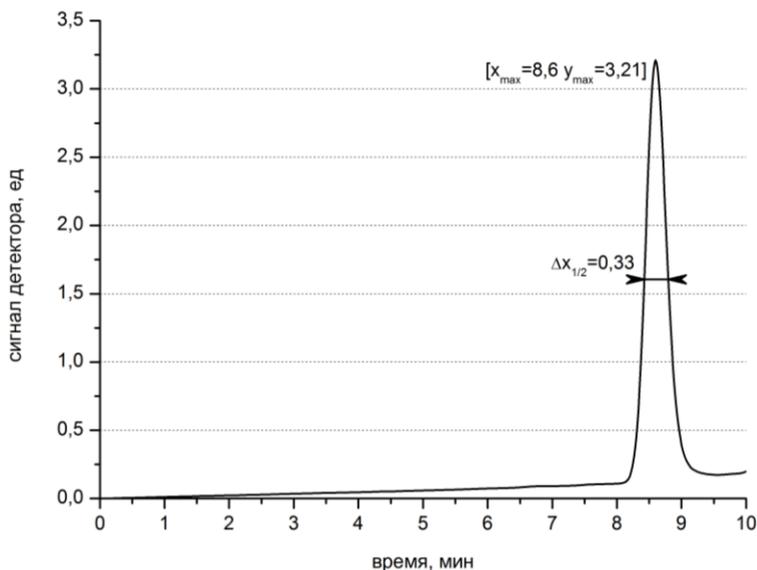


Рис. 5

3.7. На рис. 6 приведена хроматограмма витаминов в пищевых продуктах на колонке с нуклеосилом NH₂ (250×4 мм, зернение 10 мкм), ПФ – гептан-хлороформ (80:20), расход – 3,5 мл/мин, в качестве детектора использовался спектрофотометр, работающий на длине волны 254 нм, проба – 5 мкл. На хроматограмме присутствуют пики, соответствующие витамину А (ретинол), витами-

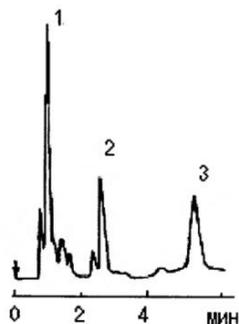


Рис. 6

ну D₃ (холекальциферол) и витамину E (токоферол). Определите последовательность выхода веществ из колонки. Представьте в качественном виде хроматограмму этих витаминов при изменении состава элюента на: А) гептан: хлороформ (95:5); Б) хлороформ: гептан (80:20).

3.8. При хроматографическом разделении смеси липидов в изократическом режиме (20/80 ацетонитрил/вода) на колонке с фазой C₁₈ время выхода исследуемого фосфолипида оказалось равным 13,0 мин, ширина пика – 20 с. Условия разделения были следующими: скорость элюции 200 мкл/мин, длина колонки 25 см, диаметр колонки – 4,6 мм, диаметр гранул сорбента – 5 мкм, $T = 25^{\circ}\text{C}$, давление – 100 бар. Время выхода урцила при данных условиях – 12,7 мин. Найдите коэффициент диффузии фосфолипида. Как изменится ширина пика при увеличении концентрации ацетонитрила в два раза?

3.9. Определите размер гранул сорбента, при котором можно достигнуть максимального разрешения для пептида RALSPPVAK, если при изократическом режиме 40/60 ацетонитрил/вода на обращенно-фазовой колонке C₈: $d_{\text{гранул}} = 5$ мкм, $l = 10$ см, $2\rho = 4,1$ мм, поток элюента 1 мл/мин, давление в системе $p = 100$ бар, максимально допустимое давление в системе – 150 бар. Как изменится ответ при замене изократического режима на градиентный (линейное увеличение содержания ацетонитрила в элюенте от 10 до 50% в течение 15 мин)? Во сколько раз при этом изменится высота эквивалентной теоретической тарелки? В табл. 1 приведена вязкость смеси вода/ацетонитрил в зависимости от процентного содержания ацетонитрила.

Таблица 1

x_2	η /(мПа с)
0.0000	0.8904
0.0225	0.9457
0.0465	0.9759
0.0718	0.9808
0.0989	0.9687
0.1278	0.9453
0.1583	0.9165
0.2264	0.8404
0.3050	0.7520
0.3969	0.6535
0.5060	0.5503
0.6371	0.4572
0.7980	0.3811
0.8929	0.3537
1.0000	0.3410

3.10. На рис. 7 приведены хроматограммы смеси пептида лейцин-энкефалина ($M = 555,6$ Да) и белка лизоцима ($M = 16\,537$ Да), полученные на обращенно-фазовой колонке при градиентном элюировании (линейные градиенты от 15% до 50% и от 15% до 85% фазы В в течение 20 минут). В качестве детектора был использован спектрофотометр, работающий на длине волны 215 нм. Фаза А состояла из 99,9 % воды и 0,1 % трифторуксусной кислоты (ТФУ), фаза В состояла из 99,9 % ацетонитрила и 0,1 % ТФУ. Считая, что мертвое время движения подвижной фазы от смесителя до колонки равно 1 мин, определите времена выхода лейцин-энкефалина и лизоцима при смене режима элюирования на изократический с соотношением фаз А/В равным, 60/40 и 65/35. На основании полученных данных сравните поведение коротких пептидов и белков при использовании обращенно-фазовой хроматографии (см. Рис. 7).

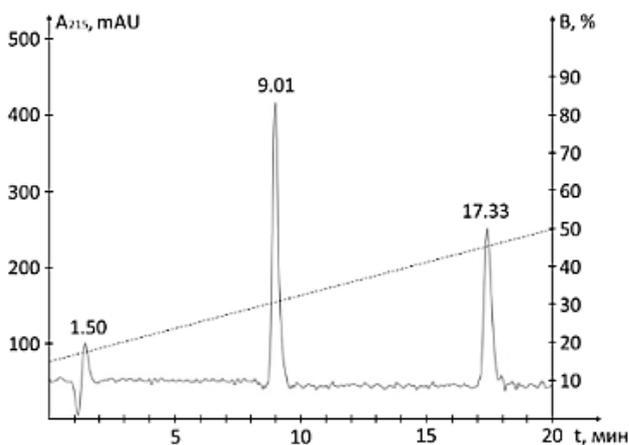
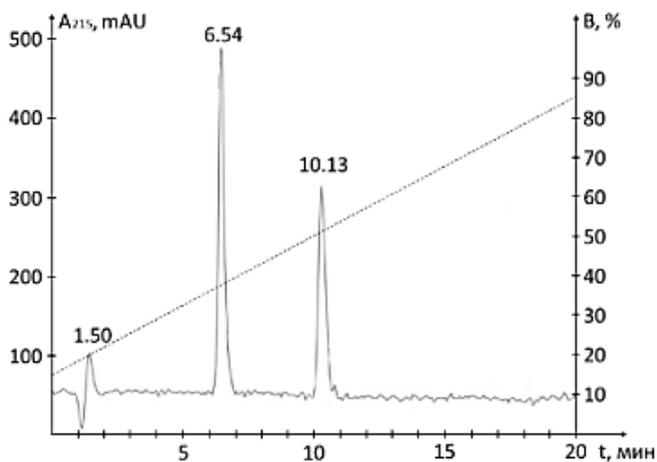


Рис. 7

4. Измерение давления и вакуумная техника

4.1. В системе транспорта ионов масс-спектрометра используется так называемая *постадийная откачка*, которая представляет собой последовательность вакуумных камер, разделённых диафрагмами (рис. 8). В вакуумной камере 1 давление равно $P_1 = 1$ Торр. Камеры 1 и 2 разделяются диафрагмой, проводимость которой при рабочем давлении $G_2 = 0,3$ л/с. Камеры 2 и 3 разделяются диафрагмой, диаметр отверстия которой равен $d_3 = 2,5$ мм. Производительности насосов, откачивающих камеры 3 и 2, соответственно равны $S_3 = 270$ л/с, $S_2 = 40$ л/с. Объем первой камеры 3 л, второй и третьей – по 0,7 л. Определите давление в камерах 2 и 3. Насосы какого типа могут использоваться в этой установке?

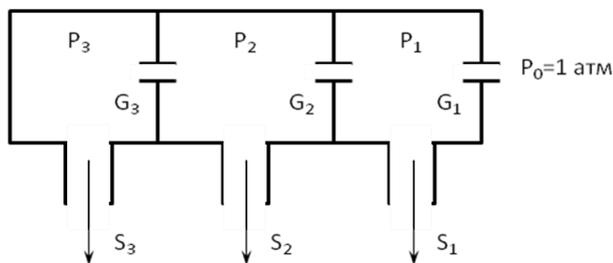


Рис. 8

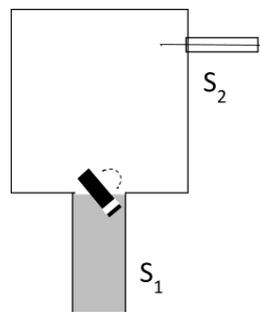


Рис. 9

4.2. Вакуумная камера напылительной установки (рис. 9) может работать в двух режимах – режиме разряда (при давлении 10^{-2} Торр) и режиме очистки камеры (при давлении 10^{-9} Торр). Камера откачивается турбомолекулярным насосом производительностью $S_1 = 180$ л/с. Насос отделяется от камеры заслонкой с отверстием. Когда заслонка закрыта, установка работает в режиме разряда, а при открытой заслонке – в режиме очистки. Определите диаметр отверстия в заслонке, необходимый для обеспечения работы системы, если в систему постоянно напускается аргон с объемным потоком $S_2 = 0,5$ л/с. Определите время, за которое в системе устанавливается давление 10^{-9} Торр, необходимое для режима очистки. Камера представляет собой цилиндр диаметром 5 см, высотой 10 см.

4.3. Для проведения кинетических исследований в вакуумную камеру производится импульсный напуск азота. Для этого была собрана система импульсного напуска, показанная на рис. 10. Напуск в вакуумную камеру,

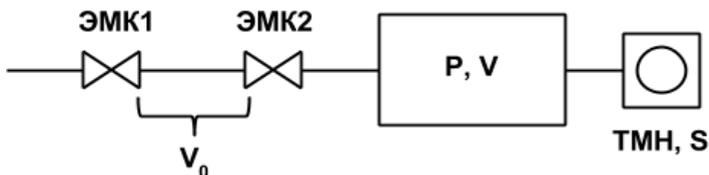


Рис. 10

объем которой равен $V = 5$ л и давление $P = 10^{-6}$ Торр, осуществляется посредством пары электромагнитных клапанов ЭМК1 и ЭМК2. Сначала открывается клапан ЭМК2 (клапан ЭМК1 закрыт), и пространство между клапанами вакуумируется. После чего клапан ЭМК2 закрывается и открывается клапан ЭМК1, через который в пространство между клапанами напускается азот при давлении $P_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ Торр. После этого клапан ЭМК1 закрывают и открывают клапан ЭМК2 для того, чтобы напустить порцию газа в вакуумную камеру. Объем пространства между клапанами $V_0 = 100$ мл. Вакуумная камера откачивается турбомолекулярным насосом (ТМН), объемная скорость откачки которого $S = 70$ л/с. Найдите время, которое потребуется для того, чтобы турбомолекулярный насос откачал газ, напускаемый за один цикл, и вернул систему в исходное состояние.

4.4. Напуск газа в вакуумную камеру осуществляется из балластного объема, давление в котором равно $P_0 = 10^{-3}$ Торр. Давление в вакуумной камере равно $P = 10^{-6}$ Торр и поддерживается турбомолекулярным насосом. Определите необходимую объемную скорость откачки турбомолекулярного насоса для поддержания заданного давления в вакуумной камере. Диаметр отверстия диафрагмы, отделяющей балластный объем от вакуумной камеры, $d = 1$ мм. Натекание газа через негерметичности пренебрежимо мало по сравнению с натеканием газа через систему напуска. Напускаемый газ – азот.

4.5. В измерительной ячейке масс-спектрометра ионы удерживаются в параболической потенциальной яме, которую создает конденсатор с напряжением между пластинами 1 В. Для проведения исследований в ячейке нужно удерживать ионы N_2^+ , энергия которых на входе в ячейку равна 3 эВ. Ионы захватываются в ячейке за счет их охлаждения при соударениях с молекулами остаточного газа. Определите минимальное давление, при котором будет происходить захват ионов. Найдите производительность насоса, который потребуется для поддержания такого давления, если натекание в вакуумную камеру через негерметичности равно $I = 0,01$ л·Торр/с. Какие насосы могут использоваться для этого? *Указание: предлагается взять типичный линейный размер измерительной ячейки 5 см; используя законы механики, нужно оценить, какое число соударений требуется для термализации частицы.*

5. Масс-спектрометрия

Таблица 2

атом	а.м.
1-Н	1,007825
12-С	12,000000
14-Н	14,003074
16-О	15,994915
19-Ф	18,998403

5.1. Используя масс-спектрометрию высокого разрешения, необходимо различить следующие молекулярные ионы: а) CF_3H^+ и $\text{C}_5\text{H}_{10}^+$, б) C_4H_4^+ и CF_2H_2^+ , в) CO_2^+ и C_3H_8^+ , г) C_2H_4^+ , N_2^+ и CO^+ , д) H_2O^+ и NH_4^+ , е) OH^+ и NH_3^+ . В каком случае требуемое разрешение будет наибольшим и каким именно? Точные значения масс атомов приведены в табл. 2.

5.2. Оцените ускоряющую разность потенциалов, необходимую для различения молекулярных ионов CF_2H_2^+ и C_4H_4^+ методом времяпролетной масс-спектрометрии. Длина дрейфового пространства прибора $L = 50$ см, для детектирования сигналов используется ВЭУ с временным разрешением $\tau = 1$ нс.

5.3. Оцените разрешающую способность времяпролетного масс-спектрометра в диапазоне молекулярных масс ~ 100 а.е.м., если длина дрейфового пространства $L = 50$ см, ускоряющая разность потенциалов $U = 2$ кВ, а для детектирования сигналов используется ВЭУ с временным разрешением $\tau = 1$ нс. Какой фактор в действительности будет ограничивать разрешение масс-спектрометра?

5.4 В результате исследований на времяпролетном масс-спектрометре с ионизацией MALDI получен масс-спектр (рис. 11) смеси веществ. Определите m/z для ионов с наибольшей массой. Можно ли оценить «поступательную температуру» – разброс по скоростям? Объясните результат. Известно, что ускоряющее напряжение 25 кВ, длина бесполевого пространства 1.8 м, частота дискретизации детектора и АЦП – 1 ГГц; полученное разрешение 560.

5.5. Радиус кривизны траектории ионов в масс-анализаторе с секторным магнитным полем равен 5 см. Величина ускоряющей разности потенциалов на входе в масс-анализатор равна 500 В. При какой скорости развертки магнитного поля можно разрешить изотопы углерода молекулярного иона $\text{C}_{10}\text{H}_{21}^+$?

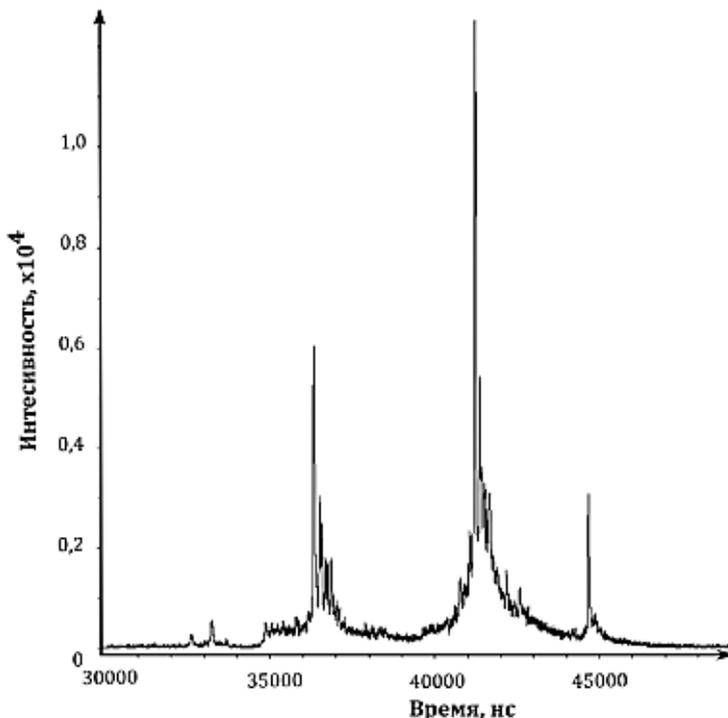


Рис.11. Масс-спектр исследуемого вещества

5.6. Для анализа ионного состава используется статический масс-анализатор с углом разворота ионов 180° и напряженностью постоянного магнитного поля 1 кГс , ускоряющая разность потенциалов $U = 2 \text{ кВ}$. Входная и выходная щели анализатора имеют равную ширину $h = 100 \text{ мкм}$. Определите максимальный допустимый угол расхождения ионного пучка на входе в анализатор, позволяющий разрешить молекулярные ионы CF_3H^+ и $\text{C}_3\text{H}_{10}^+$. Точные значения масс атомов приведены в табл. 2. Что изменится, если применять масс-анализатор, сектор разворота которого составляет 90° ? Предложите решения для компенсации углового расхождения пучка ионов.

5.7. Молекулярный ион изопропилового спирта, образовавшийся в результате электронного удара, распадается с отщеплением радикала OH^\cdot внутри масс-спектрометра. Определите положение пика метастабильного иона в спектре и его максимальную ширину, если среднее время жизни молекулярного иона до распада равно одной трети времени нахождения иона в вакуумной камере масс-спектрометра. Для оценок можно взять параметры современных масс-спектрометров с секторным магнитным полем.

Как изменится наблюдаемая картина, если в масс-спектрометре применяется двойная фокусировка? При оформлении данной задачи необходимо привести соответствующие иллюстрации и пояснения.

5.8. Смоделируйте масс-спектр диметилтартрата ($C_6H_{10}O_6$, рис. 12), который получится при использовании масс-спектрометрии высокого разрешения в комбинации с методами ионизации электронным ударом, химической ионизации в коронном разряде (химической ионизации при атмосферном давлении), ионизации электро-распылением. Какие методы ввода вещества в масс-спектрометр целесообразно использовать при проведении таких исследований?

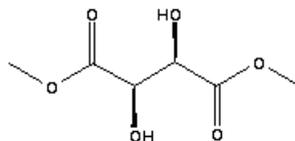


Рис. 12

5.9. Постройте эскиз масс-спектра пептида ангиотензин I (Asp-Arg-Val-Tyr-Ile-His-Pro-Phe-His-Leu, $C_{62}H_{89}N_{17}O_{14}$) на масс-спектрометре с ионизацией MALDI и ESI. Каков будет вид масс-спектра при а) высоком и б) низком разрешениях?

5.10. Масс-спектры ионов, полученных при ионизации электронным ударом неизвестных органических веществ, содержат однозарядные молекулярные ионы, изотопная структура которых представлена в табл. 3. Определите их брутто-формулы.

Таблица 3

Вещество 1		Вещество 2		Вещество 3	
m/z	Отн. инт.	m/z	Отн. инт.	m/z	Отн. инт.
84	31,3	107	100	78	23,6
85	2,06	108	8,0	79	0,79
86	0,08	109	0,3	80	7,55

5.11. Для контроля процессов, происходящих в газовом химическом реакторе, используется квадрупольный масс-анализатор. Ионизация газа происходит методом электронного удара. На рис. 13 показан масс-спектр исходных веществ, а на рис. 14 – масс-спектр продуктов, образовавшихся в результате химического процесса в реакторе. Определите исходные вещества в реакторе. Какая часть каждого исходного вещества вступила в реакцию? Какие относительные концентрации веществ? По вертикальной оси отображены абсолютные величины сигналов, настройки масс-анализатора и детектора во время контроля не изменялись.

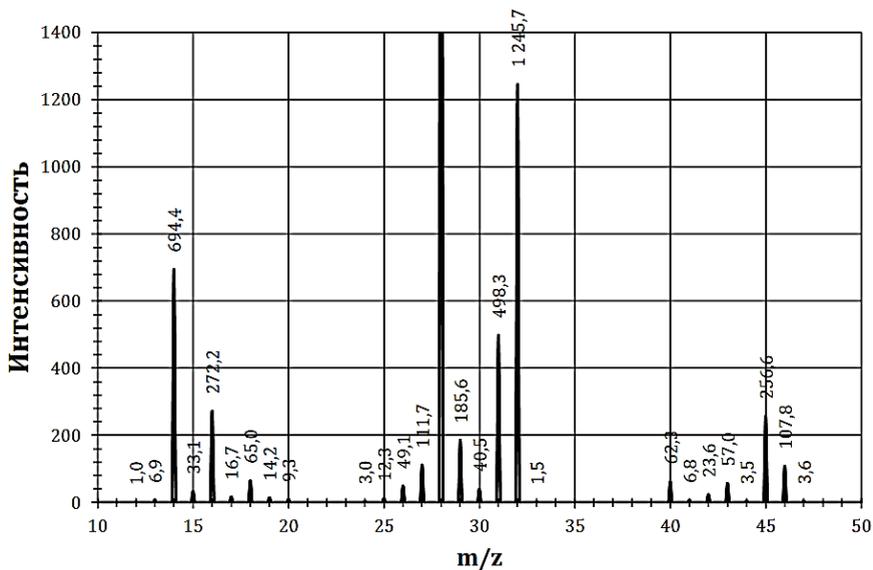


Рис. 13. Масс-спектр исходных веществ

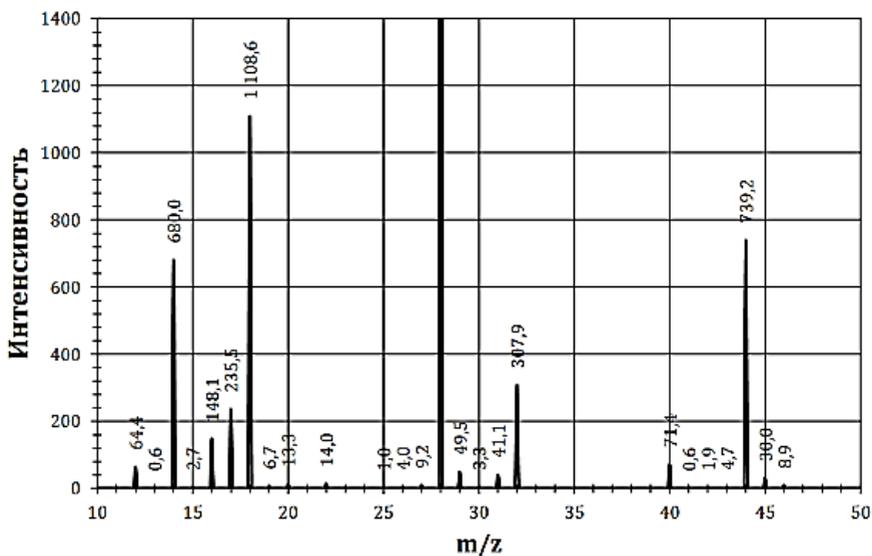


Рис. 14. Масс-спектр продуктов реакции

5.12. При ионизации методом электрораспыления получены молекулярные ионы белка массой 10^4 со средним зарядом +12. Напряжённость магнитного поля в измерительной ячейке ионно-циклотронного резонанса составляет 10 Тл, максимальная неоднородность поля равна 10^{-3} Тл/мм. Перед детектированием осуществляется возбуждение циклотронного движения ионов, в результате которого ионное облако находится на циклотронной орбите на расстоянии 2 см от оси симметрии измерительной ячейки. При каком минимальном времени детектирования сигнала возможно наблюдение изотопной структуры масс-спектров? При каком давлении остаточного газа в измерительной ячейке ИЦР возможно достижение требуемой величины разрешающей способности? Оцените вклад неоднородности магнитного поля в уширение линий в масс-спектре.

5.13. Перед вами поставлена задача сконструировать масс-спектрометр для измерения относительного содержания различных изотопов тяжелых металлов в пробах биологического материала. Какую конструкцию Вы можете предложить для такого масс-спектрометра (ионный источник, тип масс-анализатора, детектор, способ ввода ионов в масс-анализатор, система откачки)? Каковы требуемые значения основных аналитических характеристик?

Литература

Основная

1. Франкевич Е.Л. Физические методы исследования: учеб. пособие. М.: МФТИ, 1978 (Ч.1); 1980 (Ч.2); 1986 (Ч.3).
2. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир, 2003.
3. Драго Р. Физические методы в химии. Т. 1,2. М.: Мир, 1981.
4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2002.
5. Клаассен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. М.: Постмаркет, 2000.
7. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: КомКнига, 2006.
8. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. М.: Техносфера, 2013.
9. Устынюк Ю.А. Лекции по спектроскопии ядерного магнитного резонанса. Ч. 1 (вводный курс). М.: Техносфера, 2016.
10. Пергамент М.И. Методы исследований в экспериментальной физике. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2010.
11. Бенуэлл К. Основы молекулярной спектроскопии. М.: Мир, 1985.
12. Сердюк И., Заккаи Н., Заккаи Дж. Методы в молекулярной биофизике. Структура, функция, динамика: уч. пособие в 2-х томах. Красноярск: Издательство КДУ, 2009.

Дополнительная

Общие проблемы процесса измерения

1. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 1985.
2. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 1. М.: Мир, 1983.

Передача сигналов по электрическим цепям

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996.
2. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. 1. М.: Мир, 1993.
3. Харкевич А.А. Теоретические основы радиосвязи. М.: ГИТТЛ, 1957.

Измерение давления

1. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. М.: Мир, 1975.
2. Пипко А.И., Плисковский В.Я. Основы вакуумной техники. М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990.

Измерение температуры

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
2. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992.
3. Смирнов Б.М. Введение в физику плазмы. М.: Наука, 1982.
4. Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды /под ред. В. Лохте-Хольгрёвен. М.: Мир, 1971.

5. Кинджери В. Измерения при высоких температурах. М.: Metallurgizdat, 1963.

Измерение и генерация потоков излучения

1. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. М.: Изд-во МГУ, 1999.

2. Курбатов Л.Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. М.: Изд-во МФТИ, 1999.

Масс-спектрометрия

1. Сысов Ф.Ф., Чулахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат, 1977.

2. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.

3. Бернард Дж. Современная масс-спектрометрия. М.: ИЛ, 1957.

Хроматография

1. Колюхов В.Ю. Хроматография. СПб.: Лань, 2016.

2. Лейбниц Э., Штруппе Х.Г. Руководство по газовой хроматографии. Т. 1, 2. М.: Мир, 1988.

3. Айвазов Б.В. Основы газовой хроматографии. М.: Высшая школа, 1977.

4. Жуховицкий О.А. Основы жидкостной хроматографии. М.: Мир, 1973.

Магнитная радиоспектроскопия

1. Вертц Дж., Болтон Дж. Теория и практические приложения метода ЭПР. М.: Мир, 1975.

2. Воловенко Ю.М., Карцев В.Г., Комаров И.В., Туров А.В., Хиля В.П. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса для химиков. М.: МБФНП, 2011.

3. Фаррар Т., Беккер Э. Импульсная и фурье-спектроскопия ЯМР. М.: Мир, 1973.

4. Чижик В.И. Ядерная магнитная релаксация. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2004.

5. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. М.: Мир, 1984.

6. Маклочан К.А. Магнитный резонанс. М.: Химия, 1976.

7. Сликтер Ч. Основы теории магнитного резонанса. М.: Мир, 1967.

Оптическая спектроскопия

1. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988.

2. Лакович Дж. Основы флуоресцентной спектроскопии. М.: Мир, 1986.

3. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976.

4. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1969.

5. Шмидт В. Оптическая спектроскопия для химиков и биологов. М.: Техносфера, 2007.

6. Звелто О. Принципы лазеров. 4-е изд. СПб.: Издательство «Лань», 2008.

**Перечень учебно-методического обеспечения департамента
для самостоятельной работы студентов,
обучающихся по дисциплине
«ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ»**

1. Максимычев А.В. Физические методы исследования. 1. Погрешности измерений: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2006.
2. Максимычев А.В. Физические методы исследования. 2. Сигналы в длинных линиях: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2006.
3. Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 2. Электрические цепи. Измерение импульсных сигналов: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2004.
4. Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 3. Методы измерения давлений: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2005.
5. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Излучатели, использующие потоки ускоренных электронов: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2015.
6. Семёнов Ю. С. Длинные линии: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2015.
7. Данильченко Н.А., Ткаченко С.И. Исследование параметров плазмы с помощью электрического зонда: лабораторная работа: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2016.
8. Максимычев А.В. Газо-адсорбционная хроматография: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2009.
9. Ткаченко С.И., Хоменко А.Ю. Определение удельной поверхности пористых материалов методом БЭТ и Арановича: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2014.
10. Попов И.А., Кукаев Е.Н., Куксин А.Ю. Газовый анализ с использованием квадрупольного масс-спектрометра: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2012.
11. Никулин С.В., Стародубцева Н.Л., Попов И.А. Высокоэффективная жидкостная хроматография. Учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2017.
12. Бочаров К.В., Марукович Н.И., Куксин А.Ю. Методы статистического и динамического рассеяния света для исследования наночастиц и макромолекул в растворах: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2016.
13. Хоменко А.Ю. Задачи семестровых контрольных работ по курсу «Физические методы исследований». М.: МФТИ, 2014.
14. Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 4. Методы измерения температуры: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2006.
15. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г., Куксин А.Ю. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Основные положения: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2012.

16. Ткаченко С.И. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Молекулярные спектры: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2012, 2016.
17. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Тепловые и газоразрядные источники излучения: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2013.
18. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Квантовые излучатели: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2014.
19. Перепухов А.М., Максимычев А.В., Кишенков О.В., Куксин А.Ю. ЯМР-релаксация: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2015.
20. Максимычев А.В. Ядерный магнитный резонанс высокого разрешения: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2006.
21. Сагуленко П.Н., Нуднова М.М., Анохим Е.М. Инфракрасная спектроскопия поглощения. Колебательно-вращательные спектры двухатомных молекул: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2012.
22. Попов И.А., Зубцов Д.А., Зубцова Ж.И. Изучение электронно-колебательных спектров поглощения двухатомных молекул на примере молекулы I_2 : лабораторная работа. М.: МФТИ, 2012.
23. Кукаев Е.Н., Куксин А.Ю., Тишкина А.О. Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2016.
24. Вервикишко П.С. Измерение высоких температур методом яркостной пирометрии: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2016.
25. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Детекторы оптического излучения: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2017.