

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. 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.

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: спектроскопы, спектрографы, спектрофотометры, 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.

Люминесценция и ее подтипы. Флуоресцентная спектроскопия. Флуоресценция и фосфоресценция. Квантовый выход флуоресценции и время жизни возбужденного состояния. Процессы тушения флуоресценции. Поляризация флуоресценции, ее применение. Безызлучательный перенос энергии и оценка расстояния между хромофорными группами.

4. Измерение температуры

Понятие температуры в равновесных и неравновесных системах. Контактные и бесконтактные методы измерения температуры. Равновесное излучение. Формула Планка. Яркостная, цветовая и радиационная пирометрия. Методы измерения температуры электронов и тяжелых частиц.

7 семестр

5. 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.

6. Радиоспектроскопия

Магнитные моменты электрона, ядер и атомов. ЯМР-активные ядра. Гиромагнитное отношение и g-фактор. Спин в постоянном магнитном поле. Магнитный момент и Ларморова прецессия. Уравнение Блоха. Поглощение энергии ВЧ-поля системой ядерных спинов. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса. Химический сдвиг: константа экранирования, единицы измерения, магнитно-эквивалентные ядра. Спин-спиновое взаимодействие,

спектры первого порядка, простые правила интерпретации сверхтонкой структуры. Применение метода ЯМР для исследования структуры и динамики 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, методы их измерения. Импульсные методы ЯМР: 90° и 180° импульсы. Фурье-спектроскопия ЯМР. Спиновое эхо.

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 поляризующего магнитного поля, запись спектров в виде производной. Сопоставление частотных диапазонов и ширины линий ЭПР и ЯМР.

7. Измерение давления и вакуумная техника

Физические границы низкого, высокого и сверхвысокого вакуума. Различные режимы течения газа. Процессы переноса при различных давлениях и температурах: диффузия, 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 и их влияние на скорость откачки и предельный вакуум. Методы обнаружения течей.

8. 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. Сек-

торный 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. Применение масс-спектрометрии для решения задач биологии, химии, анализа окружающей среды, фармакологии, построения систем безопасности.

9. Хроматография

Физическая и химическая адсорбция. Адсорбционно-десорбционное равновесие. Изотермы адсорбции. Изотермы Ленгмюра, Генри, полислойной адсорбции. Адсорбция и распределение, как основа хроматографического разделения. Закон распределения Нернста. Хроматографическое разделение смеси веществ. Принципиальное устройство и схема работы хроматографа. Кинетика адсорбции-десорбции в потоке подвижной фазы. Концепция теоретических тарелок. Основные выводы теории теоретических тарелок. Ширина и форма хроматографического пика. Уравнение Ван-Деемтера. Аналитические характеристики хроматографической системы и отдельных её элементов.

Устройство газового хроматографа. Набивные и капиллярные хроматографические колонки, их параметры. Детекторы в газовой хроматографии. Зависимость времени удерживания от температуры. Хроматография с программируемым нагревом.

Жидкостная хроматография. Высокоэффективная жидкостная хроматография (HPLC). Нормально-фазовая и обращено-фазовая хроматография. Разделение полимеров с помощью гелепроникающей хроматографии. Понятие об ионообменной хроматографии. Изократическое и градиентное элюирование. Зависимость времени удерживания от состава подвижной фазы. Устройство жидкостного хроматографа. Детекторы в жидкостной хроматографии.

Текущий контроль и промежуточная аттестация по дисциплине «Физические методы исследований»

Текущий контроль по дисциплине «Физические методы исследований» в **7 семестре** осуществляется в форме:

- защита заданий,
- выполнение и защита лабораторных работ.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Физические методы исследований» в **7 семестре** осуществляется в форме дифференцированного

зачёта и устного экзамена по билетам, которые формируются согласно содержанию программы курса **обоих семестров**. Дифференцированный зачет выставляется по результатам текущего контроля в течение семестра с учетом теоретических знаний и практических навыков обучающегося.

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

По результатам защиты заданий текущего контроля за каждое задание 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)**» выставляется 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 только собственноручно заполненным записями листом формата А4. Категорически запрещается использовать 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 носимых устройствах и т.п.).

Порядок проведения дифференцированного зачета

К промежуточной аттестации (дифференцированному зачету) в 7 семестре допускаются обучающиеся, защитившие домашние задания (на любую оценку отличную от 0) и лабораторные работы (не менее чем на оценку «удовлетворительно (3)»), а также написавшие семестровую контрольную работу. Обучающиеся, не защитившие хотя бы одно домашнее задание, не имеющие оценки за лабораторный практикум (либо имеющие оценку «неудовлетворительно»), а также не имеющие оценки за семестровую контрольную работу к промежуточной аттестации не допускаются. Оценка за дифференцированный зачет учитывает общую оценку за все лабораторные работы (ЛП) и оценку за семестровую контрольную работу (СКР). Общая оценка за лабораторные работы (ЛП) вычисляется как медиана оценок за отдельные лабораторные работы. Оценка за семестровую контрольную работу (СКР) вычисляется как сумма баллов за правильные решения задач семестровой контрольной работы (в тексте задач будет указано количество баллов, начисляемых за правильное решение) с учетом результатов защиты домашних заданий.

По результатам защиты домашних заданий (за каждое задание) обучающимся будут начислены бонусные либо штрафные баллы по следующей схеме:

Оценка за задание	Дополнительные баллы СКР
«отлично» (8, 9, 10)	+2.5
«хорошо» (5, 6, 7)	+1.5
«удовлетворительно» (3, 4)	0
«неудовлетворительно» (1, 2)	-2.5

Во время зачетной сессии обучающимся предоставляется не более 2-х попыток пересдач оценок «неудовлетворительно», полученных за защиту домашних заданий. Минимальная возможная оценка за СКР – «неудовлетворительно (1)». Повторное написание семестровой контрольной работы не проводится. При отсутствии на семестровой контрольной работе по уважительной причине обучающемуся предоставляется возможность написания семестровой контрольной работы в дополнительное время по предварительному согласованию. Оценка за дифференцированный зачет рассчитывается по следующей формуле: $0.4 \times \text{ЛП} + 0.6 \times \text{СКР}$.

Порядок проведения устного экзамена

Экзамен проходит в традиционной форме беседы преподавателя со студентом по теме экзаменационного билета. Экзаменационный билет содержит два теоретических вопроса из программы курса и одну задачу.

Для подготовки к устному ответу обучающемуся отводится от 45 до 60 минут. Во время подготовки к ответу студенту запрещено чем-либо пользоваться кроме письменных принадлежностей. Использование электронных устройств (в том числе средств сотовой радиосвязи) не допускается.

В процессе ответа разрешается пользоваться заранее подготовленным планом ответа и заранее подготовленными иллюстрациями/графиками, представленными в бумажном виде. Используемые графики или иллюстрации не должны содержать частей текста доклада. В процессе ответа по билету экзаменатор может задавать уточняющие вопросы. После ответа по билету экзаменатор вправе задавать студенту любые дополнительные вопросы по программе курса.

В совокупности опрос обучающегося на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.

ЗАДАНИЕ

1. Лазеры и лазерная спектроскопия

1.1. Определите добротность резонатора He–Ne-лазера, излучающего на длине волны $\lambda = 0.63$ мкм ($\nu = 4.7 \cdot 10^{14}$ Гц) при длине резонатора $L = 1$ м и коэффициенте отражения $R = 99\%$. Оцените уширение линии излучения, выходящего из резонатора в случае одномодового режима. Изобразите схематически спектр генерируемого лазером излучения, если ширина полосы усиления $\Delta\nu = 1000$ МГц.

1.2. Пусть удалось синхронизовать 200 продольных мод непрерывного лазера с длиной резонатора 50 см. Оцените период генерации и длительность полученных импульсов. Определите необходимую для синхронизации мод лазера частоту генерации УЗ-модулятора, если принять, что модуляция осуществляется на частоте межмодовых биений (т.е. равной разности частот между соседними модами резонатора).

1.3. Сечение процесса VT-релаксации (колебательно-поступательной) для молекул примеси М составляет 10^{-20} см². Время жизни молекулы М в возбужденном состоянии равно 10^{-4} с. Среднеквадратичная скорость молекул газа составляет $5 \cdot 10^4$ см/с. Оцените, при каком давлении для регистрации плотности молекул примеси М применим метод оптоакустической спектроскопии.

1.4. Коэффициент поглощения молекулы озона на длине волны 250 нм составляет 10^{-17} см². Считая, что уровень шумов интенсивности излучения лазера составляет 5%, оцените минимальную концентрацию О₃, регистрируемую методом внутриврезонаторной лазерной спектроскопии в резонаторе длиной 30 см при времени регистрации 10^{-2} с. Сравните ее с минимальной концентрацией озона, которую можно зарегистрировать методом абсорбционной спектроскопии в кювете той же длины без использования резонатора.

1.5. Энергия возбуждения атомарного кислорода составляет 8.7 эВ. Какую длину волны излучения лазера следует выбрать для измерения концентрации атомарного кислорода методом двухфотонной лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ)? Можно ли измерить плотность атомов О одnofотонной ЛИФ?

1.6. Какую минимальную плотность молекул газа X можно определить методом оптоакустической спектроскопии, если используется кювета объемом $V = 50 \text{ см}^3$, длиной $\Delta x = 10 \text{ см}$, регистрация выходного сигнала осуществляется милливольтметром, фоновый шум у которого составляет $3 \cdot 10^{-8} \text{ В}$. У газа $f = 6$ степеней свободы; абсорбционное сечение $\sigma = 10^{-16} \text{ см}^2$, квантовая эффективность (отношение излученной при флуоресценции энергии к поглощенной энергии лазерного излучения) $\eta_k = 0$, время жизни возбужденного состояния $\sim 10^{-2} \text{ с}$; мощность лазерного излучения $P_L = 100 \text{ мВт}$, чувствительность микрофона $S_m = 10^{-2} \text{ В/Па}$. С какой минимальной частотой необходимо модулировать лазерный пучок, чтобы не происходило насыщение? Какой процесс ограничивает чувствительность метода?

1.7. Какую минимальную плотность молекулярного пучка (ширина пучка $\Delta x = 0.1 \text{ см}$; абсорбционное сечение молекул $\sigma = 10^{-17} \text{ см}^2$) можно определить LIF-методом при эффективности сбора флуоресценции $\delta = 0.5$, если он просвечивается лазером с потоком излучения $n_L = 10^{16}$ фотон/с на длине волны $\lambda = 500 \text{ нм}$. Квантовая эффективность фотокатода $\eta_\phi = 0.2$, коэффициент усиления ФЭУ $k = 10^6$, темновой ток $I_t \sim 10^{-14} \text{ А}$.

2. Хроматография

2.1. Теплоты адсорбции газов A и B отличаются на 40 кДж/моль , энтропии одинаковы. Найдите отношение степеней заполнения θ_B/θ_A при совместной адсорбции, если $p_A = p_B$ и $T = 298 \text{ К}$. Рассмотрите случаи, когда $Q_B, Q_A < 100 \text{ кДж/моль}$ и $Q_B, Q_A > 200 \text{ кДж/моль}$. Считайте, что молекулярные массы газов A и B не отличаются.

2.2. При расходе газа носителя $Q = 2 \text{ мл/мин}$ в капиллярной колонке длиной $L = 10 \text{ м}$ и диаметром $d = 530 \text{ мкм}$ число теоретических тарелок для аммиака оказалось равным $10\,000$. В этих условиях адсорбция аммиака описывается изотермой Генри с константой $\chi = 0,25 \text{ см}$. Через какой промежуток времени концентрация аммиака в газовой фазе на тарелке с номером $N = 50$ достигает своего максимального значения, если объем вводимой пробы равен $0,1 \text{ мкл (н.у.)}$? Чему равно это значение (в моль/л)? Плотность аммиака при нормальных условиях равна $0,769 \text{ кг/м}^3$.

2.3. Для разделения изомеров C_8H_{18} используется капиллярная хроматографическая колонка диаметром 250 мкм и длиной 30 м . На внутреннюю поверхность колонки нанесен слой жидкой неподвижной фазы (НФ) толщи-

ной 0,5 мкм. Через колонку при температуре 60 °С продувается газ-носитель со скоростью 1 мл/мин. Известно, что время выхода первого изомера при данных условиях равно 15 мин. Определите время выхода второго изомера. Будут ли разрешены пики по базовой линии, если ВЭТТ при данных условиях равна 600 мкм? Теплоты растворения в НФ $Q_1 = 15,47$ кДж/моль и $Q_2 = 15,72$ кДж/моль.

2.4. 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 колонки – 0,1 мм, объём пробы составляет 10 мкл, длина колонки – 10 м. Время выхода максимума пика при условии, что адсорбция описывается изотермой Ленгмюра может быть найдено по формуле

$$t = t_0 + (t' - t_0)(1 - \sqrt{L_f})^2,$$

где t_0 – мёртвое время, t' – время удерживания при низкой концентрации вещества (т.е. когда перегруза колонки нет), а L_f – фактор загрузки, который равен отношению количества молекул исследуемого вещества в пробе к количеству сорбционных центров в колонке.

2.5. На рисунке 1 приведены кривые Ван-Деемтера для бутана, полученные на одной и той же капиллярной хроматографической колонке при использовании двух разных газов носителей: гелия и азота. Оцените, во сколько раз отличаются коэффициенты диффузии бутана в гелии и азоте? Как изменится число теоретических тарелок, если экспериментатор продолжит работать на скорости 50 см/с после смены газа носителя с гелия на азот? Диффузией в неподвижной фазе пренебречь.

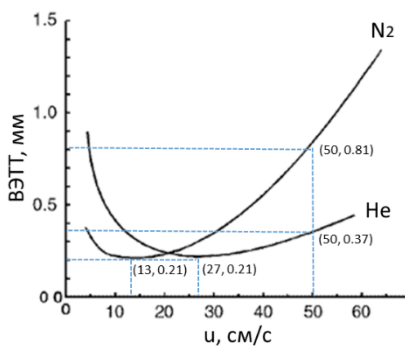


Рис. 1

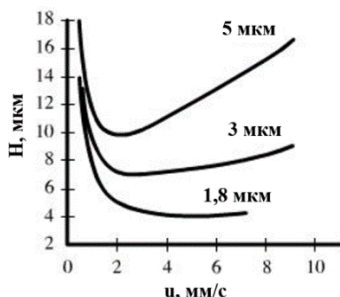
2.6. Экспериментатор планирует проводить разделение смеси метаболитов при помощи обращенно-фазовой хроматографии в изократическом режиме

40/60 ацетонитрил/вода ($\eta = 0,65$ мПа·с). У него в наличии есть две хроматографические колонки с идентичным по химической структуре сорбентом C_{18} :

- 1) $L = 15$ см, $d_c = 4.6$ мм, $d_p = 5$ мкм;
- 2) $L = 10$ см, $d_c = 2.1$ мм, $d_p = 1.8$ мкм.

Считая, что разделение проводится при линейной скорости потока 2 мм/с, оцените, как изменится число теоретических тарелок, расход элюента и давление в системе при использовании второй хроматографической колонки вместо первой. Сможет ли экспериментатор воспользоваться второй колонкой, если предельное давление имеющегося у него хроматографа равно 400 бар? Считайте, что пористость обеих колонок одинакова и равна 0,6. Перепад давлений на колонке может быть оценен по следующей формуле:

$$\Delta P [\text{Бар}] = \frac{170 \cdot \eta [\text{мПа} \cdot \text{с}] \cdot L [\text{мм}] \cdot F [\text{мл/мин}]}{(d_p [\text{мкм}])^2 \cdot (d_c [\text{мм}])^2}$$



2.7. На рисунке 2 приведена хроматограмма витаминов в пищевых продуктах на колонке с нуклеосилом NH_2 (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), витамину D_3 (холекальциферол) и витамину Е (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).

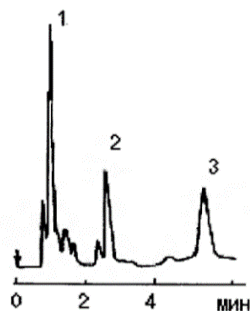


Рис.2

2.8. На рисунке 3 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.

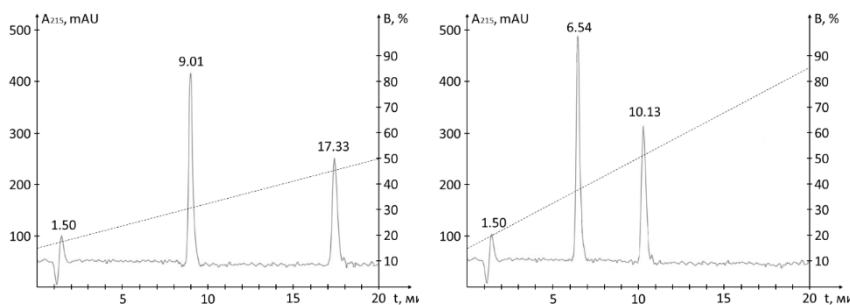


Рис. 3

3. Измерение давления и вакуумная техника

3.1. В системе транспорта ионов масс-спектрометра используется так называемая *постадийная откачка*, которая представляет собой последовательность вакуумных камер, разделённых диафрагмами (рис. 4). 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?

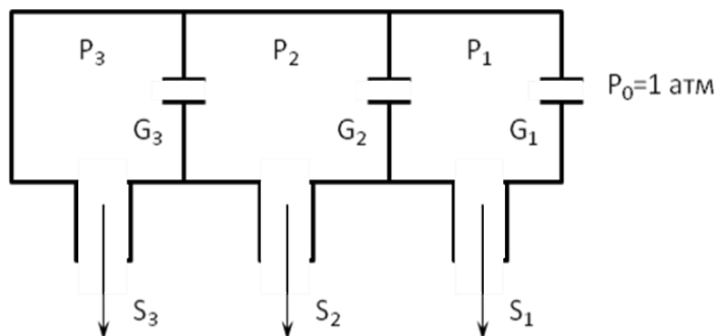


Рис. 4

3.2. Вакуумная камера напылительной установки (рис. 5) 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 $Q_2 = 0.11$ Па·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.

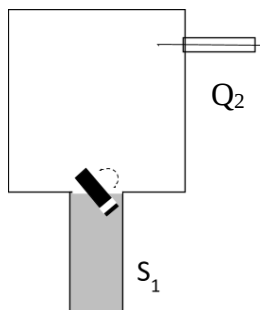


Рис. 5

3.3. Для проведения кинетических исследований в вакуумную камеру производится импульсный напуск азота. Для этого была собрана система импульсного напуска, показанная на рис. 6. Напуск в вакуумную камеру, 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.

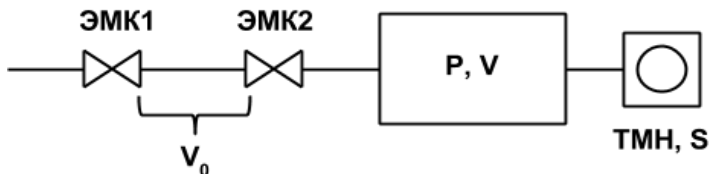


Рис. 6

3.4. 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.

3.5. 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.

4. 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

4.1. 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.

4.2. 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.

4.3. В результате исследований на времяпролетном масс-спектрометре с ионизацией MALDI получен масс-спектр (рис. 7) 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.

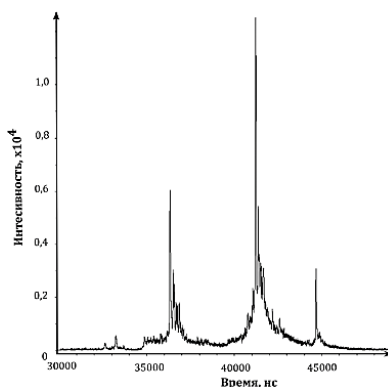


Рис. 7. Масс-спектр исследуемого вещества

4.4. 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 $\text{C}_{10}\text{H}_{21}^+$?

4.5. 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 $\text{C}_5\text{H}_{10}^+$. 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.

4.6. Смоделируйте масс-спектр диметилтартата ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$, рис. 8), 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 электрораспылением. Какие методы ввода вещества в масс-спектрометр целесообразно использовать при проведении таких исследований?

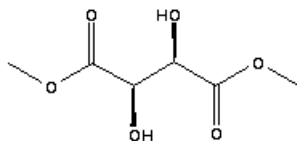


Рис. 8

4.7. Постройте эскиз масс-спектра пептида ангиотензинI (Asp–Arg–Val–Tyr–Ile–His–Pro–Phe–His–Leu, $\text{C}_{62}\text{H}_{89}\text{N}_{17}\text{O}_{14}$) на масс-спектрометре с ионизацией MALDI и ESI. Каков будет вид масс-спектра при а) высоком и б) низком разрешениях?

4.8. 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

4.9. При ионизации методом электрораспыления получены молекулярные ионы белка массой $\sim 10^4$ со средним зарядом $+12$. Напряженность магнитного поля в измерительной ячейке ионно-циклотронного резонанса состав-

ляет 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.

4.10. 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?

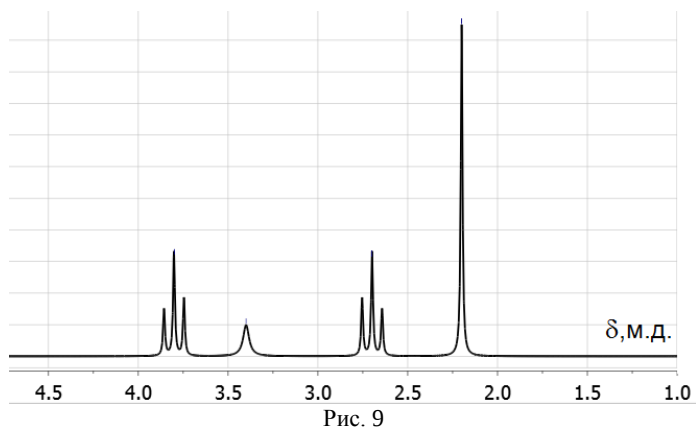
5. Спектроскопия ЯМР и ЭПР

5.1. В спектре системы типа AX_2 наблюдается пять линий, характеризующихся величинами $\delta_1 = 5.8$, $\delta_2 = 5.7$, $\delta_3 = 1.1$, $\delta_4 = 1.0$, $\delta_5 = 0.9$ м.д. (относительно ТМС). Каковы химические сдвиги ядер А и Х и константы взаимодействия между ними? Рабочая частота спектрометра 90 МГц.

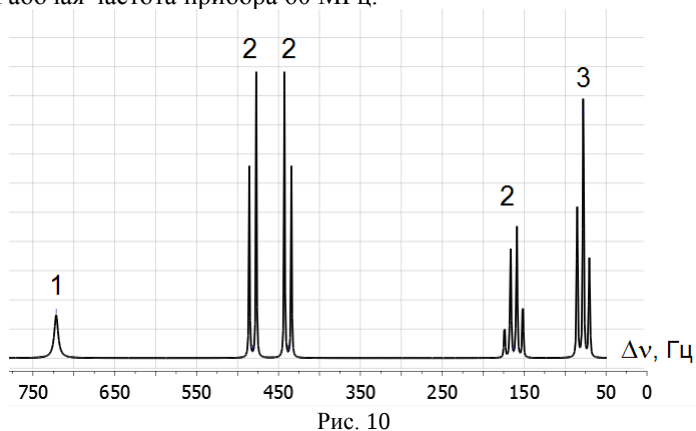
5.2. Изобразите вид спектра ПМР (с учетом магнитной неэквивалентности ядер, расщепления линий и интенсивностей) следующих веществ: $H_3C - ^{31}PH - CH_3$, додецилсульфата натрия $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$, $H_2C=CNCl$ и $(H_3C)_2N-COH$.

5.3. Определите структуру соединения состава $C_4H_8O_2$ по его спектру ПМР (см. рис. 9). Оцените время релаксации для протонов этого соединения. Объясните различие в ширине линий в области 2–3 м.д. и ~ 3.4 м.д. Расстояние между компонентами линий в мультиплетах составляет 5 Гц.

5.4. Оцените рабочую частоту (и напряженность постоянного магнитного поля) прибора, необходимую для получения ПМР-спектра, приведенного в предыдущей задаче (с таким же разрешением). Каков масштаб допустимой неоднородности постоянного магнитного поля (в Тл)? Как изменится вид спектра, если использовать магнитное поле B_0 , в 5 раз большее?



5.5. Определите структуру соединения $C_8H_{10}O$ по его спектру ПМР (рис. 10, числа рядом с линиями обозначают интегральную интенсивность). Шкала соответствует сдвигу резонансной частоты в герцах относительно ТМС. Рабочая частота прибора 60 МГц.



5.6. Как выглядит мультиплетная структура сигналов растворителя – дейтерированного диметилсульфоксида (ДМСО) – в ЯМР-спектрах на изотопах 1H и ^{13}C ? Доля изотопов дейтерия в ДМСО 99.8 % (от общего числа атомов водорода), содержание остальных изотопов естественное. Для справки: $\gamma/2\pi = 42.58$ МГц/Тл для 1H , 6.54 МГц/Тл для 2H и 10.7 МГц/Тл для ^{13}C . Структурная формула недейтерированной молекулы: $H_3C - SO - CH_3$.

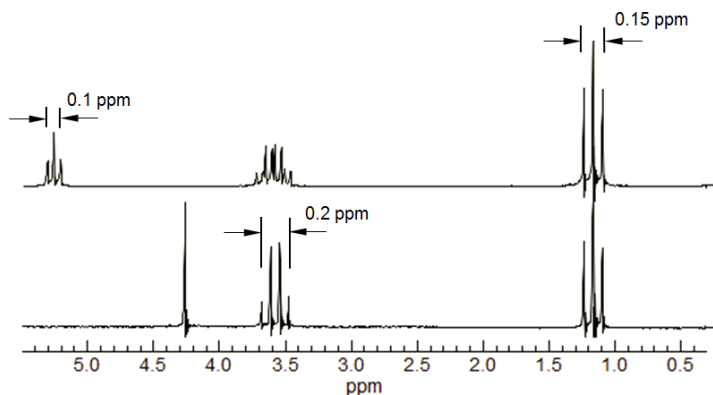


Рис. 11

5.7. На рис. 11 представлены ПМР спектры (в м.д. относительно ТМС) чистого этанола $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{OH}$ (верхняя часть) и его раствора в CCl_4 (нижняя часть). Рабочая частота прибора 60 МГц. Считая, что ширина линии OH в спектре этанола в CCl_4 составила 0.5 Гц, оцените скорость протонного обмена в этих условиях.

5.8. Оцените, во сколько раз отличается мощность стационарно поглощаемой энергии в условиях ядерного магнитного резонанса на ядрах ^1H и ^{13}C в ТМС при одной и той же величине напряженности постоянного магнитного поля и природном изотопном составе?

5.9. Изобразите схематично ЭПР-спектры радикалов $\text{C}^*\text{H}_2\text{D}$ и C^*HD_2 . Рассчитайте отношение констант СТВ $a(\text{H})/a(\text{D})$.

5.10. На рис. 12 приведены спектры ЭПР растворов радикала $[(\text{H}_3\text{C})_3\text{C}]_2\text{N}^*\text{O}$ в этаноле при комнатной температуре при изменении концентрации раствора. Оцените частоту соударения радикалов в растворе с концентрацией а) 0.01 и б) 0.1 М.

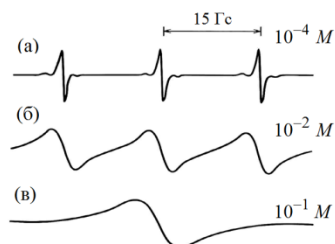


Рис. 12

5.11. Используя приведенный на рис. 13 спектр ЭПР, определите, вблизи каких ядер представленного анион-радикала вероятность пребывания неспаренного электрона наибольшая?

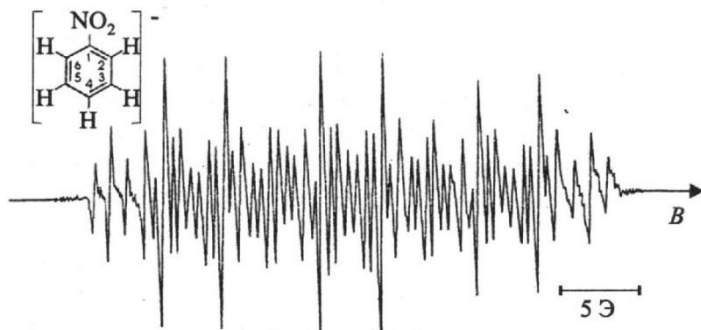


Рис. 13

5.12. В методе фурье-спектроскопии ЯМР-спектр получают как преобразование Фурье от сигнала спада свободной индукции после действия 90° импульса. Оцените минимальную длительность 90° импульса, необходимого для возбуждения спектральных линий во всем диапазоне химических сдвигов для ядра ^{31}P : ~ 700 м.д. Постоянное магнитное поле спектрометра $B_0 = 10$ Тл. Для ^{31}P величина $\gamma/2\pi = 17.2$ МГц/Тл.

5.13*. Для системы двух спинов ядер ^1H и ^{15}N , связанных спин-спиновым взаимодействием $J_{\text{NH}} \sim 90$ Гц, в тепловом равновесии разности заселенностей водородных и азотных переходов составляют $2 \Delta\text{H}$ и $2 \Delta\text{N}$ (см. рис. 14). Например, заселенность первого (нижнего) уровня больше средней на величину $(\Delta\text{H} + \Delta\text{N})$, а следующего – на величину $(\Delta\text{H} - \Delta\text{N})$, что обозначено на рисунке у соответствующих уровней. Вид ЯМР спектров, полученных преобразованием Фурье сигналов, зарегистрированных после действия 90° импульса, представлен на рис. 14 справа.

а) Оцените, чему равно отношение $\Delta\text{N}/\Delta\text{H}$.

б) Во сколько раз изменятся разности заселенностей уровней и интенсивности линий в ЯМР спектре ^{15}N , если перед регистрацией включается 180° импульс, инвертирующий заселенность уровней для перехода H_1 ? Т.е. схема эксперимента: (вывод на равновесие) – $180^\circ_{\text{H}_1}$ – 90°_{N} – регистрация.

в) Какова должна быть длительность 180° импульса, чтобы добиться воздействия лишь на один переход H_1 , не затронув H_2 ?

Считать, что образец обогащен изотопом ^{15}N , а $\gamma_{\text{H}_1}/2\pi = 42.6$ МГц/Тл, $\gamma_{\text{N}_1}/2\pi = -4.32$ МГц/Тл.

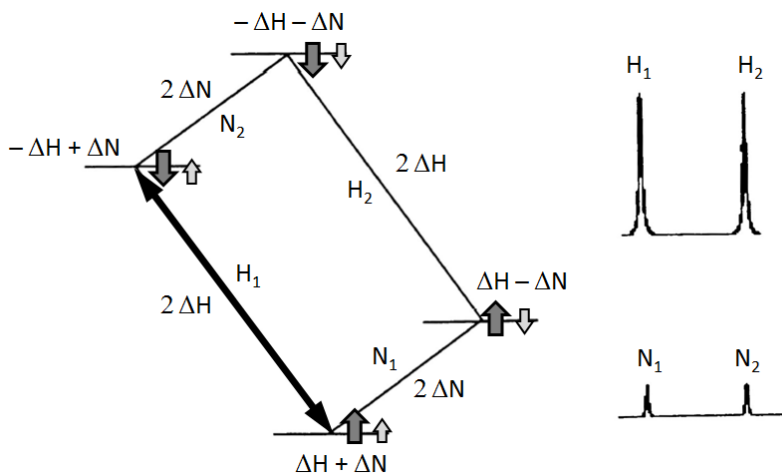
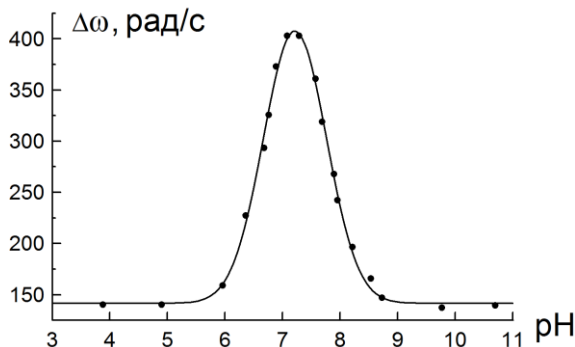


Рис. 14

5.14. Оцените, во сколько раз отличается ширина линий магнитного резонанса в следующих случаях: а) ПМР во льду; б) ПМР в воде.

5.15. На рисунке представлена зависимость ширины линии ЯМР для ядер ^{17}O в воде от pH при 24 °С. Кислотность среды регулировалась добавками NaOH или HCl. $J_{\text{OH}} = 90$ Гц, но в указанных условиях структура линии не проявляется. Качественно объясните наблюдаемую зависимость и оцените время жизни протона в молекуле воды.



5.16. Опишите, как будет вести себя система, запишите уравнения движения и определите характерные частоты для следующих систем: а) электрон в постоянном магнитном поле; б) магнитный момент набора атомов со спином $1/2$ и g-фактором 2 отклонен на некоторый угол от оси постоянного магнитного поля; в) магнитная стрелка компаса с магнитным моментом M

и моментом инерции I (относительно оси, на которой она закреплена) отклонена на некоторый угол от направления постоянного магнитного поля; г) магнитный момент набора атомов со спином $1/2$ и g -фактором 2 помещен в магнитное поле с постоянной составляющей $\mathbf{H}_0$ и переменной $\mathbf{H}_1 \cdot \cos \omega t$ (линейно поляризованной, $\mathbf{H}_1 \perp \mathbf{H}_0$). Процессами диссипации и релаксации пренебречь.

Литература

Основная

1. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир, 2003.
2. Драго Р. Физические методы в химии. Т. 1, 2. М.: Мир, 1981.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2002.
4. 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 в органической химии. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.
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. Сысоев Ф.Ф., Чупахин М.С. Введение в масс-спектрометрию. М.: Атомиздат, 1977.
2. R.B. Cole, Electrospray and MALDI Mass Spectrometry: Fundamentals, Instrumentation, Practicalities, and Biological Applications. Wiley; 2nd Edition (April 26, 2010).

Хроматография

1. Конохов В.Ю. Хроматография. СПб.: Лань, 2016.
2. Лейбниц Э., Штрuppe 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. Keeler J. Understanding NMR spectroscopy. Wiley, 2002.
3. Керрингтон А., Мак-Лечлан Э. Магнитный резонанс и его применение в химии. М.: Мир, 1970.
4. Воловенко Ю.М., Карцев В.Г., Комаров И.В., Туров А.В., Хия В.П. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса для химиков. М.: МБФНП, 2011.
5. Дероум Э. Современные методы ЯМР для химических исследований. М.: Мир, 1992.
6. Практикум по магнитному резонансу: Учеб. пособие / Под ред. В.И. Чижика. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2003.
7. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР. М.: Мир, 1984.
8. Фаррар Т., Беккер Э. Импульсная и фурье-спектроскопия ЯМР. М.: Мир, 1973.
9. Маклочан К.А. Магнитный резонанс. М.: Химия, 1976.
10. 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. 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.
12. Хоменко А.Ю. Задачи семестровых контрольных работ по курсу «Физические методы исследований». М.: МФТИ, 2014.
13. Стариковская С.М. Физические методы исследования. Семинарские занятия. 4. Методы измерения температуры: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2006.
14. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Куксин А.Ю. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Основные положения: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2012.

15. Ткаченко С.И. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Молекулярные спектры: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2012, 2016.
16. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Тепловые и газоразрядные источники излучения: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2013.
17. Ткаченко С.И., Калинин Ю.Г. Исследование вещества по его излучательно-поглощательным характеристикам. Квантовые излучатели: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2014.
18. Перепухов А.М., Максимычев А.В., Кишенков О.В., Куксин А.Ю. ЯМР-релаксация: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2015.
19. Максимычев А.В. Ядерный магнитный резонанс высокого разрешения: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2006.
20. Сагуленко П.Н., Нуднова М.М., Анохин Е.М. Инфракрасная спектроскопия поглощения. Колебательно-вращательные спектры двухатомных молекул: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2012.
21. 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.
22. Кукаев Е.Н., Куксин А.Ю., Тишкина А.О. Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса: учебно-методическое пособие. М.: МФТИ, 2016.
23. Вервикишко П.С. Измерение высоких температур методом яркостной пирометрии: лабораторная работа. М.: МФТИ, 2016.
24. Никулин С.В., Стародубцева Н.Л., Попов И.А. Высокоэффективная жидкостная хроматография. М.: МФТИ, 2017.
25. Стародубцева Н.Л., Высоких М.Ю. Современные методы исследования веществ и материалов. Оптические методы : учебное пособие.— М. : МФТИ, 2018 . ISBN 978-5-7417-0674-9.

ПРОГРАММА И ЗАДАНИЕ
по дисциплине
«Физические методы исследований»

Программу и задание
составили:

к.ф.-м.н., доц. И. А. Попов
д.ф.-м.н., проф. А. В. Максимычев
д.ф.-м.н., проф. С. И. Ткаченко
к.ф.-м.н. В. В. Бревнов
ст. преп. Е. Н. Кукаев
к.ф.-м.н. А. Ю. Куксин
к.ф.-м.н. А. Д. Залесский
асс. Ю. С. Семенов
асс. С. В. Никулин
асс. Н. А. Данильченко
асс. Р. Е. Левин