

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ
В МЕДИЧНІЙ ФІЗИЦІ**

**Частина 1. Фізичні основи методу аналізу структури та
компонентного складу зразків на основі вимірювання
спектрів поглинання**

**Методичні вказівки до виконання
лабораторних робіт**

Київ – 2024

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ
В МЕДИЧНІЙ ФІЗИЦІ**

Ірина ДОРОШЕНКО

Олена ПАВЛЕНКО

Андрій МІСЮРА

Оксана ДМИТРЕНКО

Микола КУЛІШ

Андрій ЛЕСЮК

Андрій МОМОТ

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1

Аналіз структури та компонентного складу зразків на основі вимірювання спектрів ІЧ поглинання	4
---	---

Лабораторна робота №2

Визначення поліетилену методом вимірювання спектрів ІЧ поглинання	14
---	----

Лабораторна робота №3

Прояви особливостей структури рідин з міжмолекулярним водневим зв'язком в спектрах ІЧ поглинання	21
--	----

Лабораторна робота №4

Спектральні властивості амінокислоти триптофану	26
---	----

Література	32
------------	----

Лабораторна робота №1

Аналіз структури та компонентного складу зразків на основі вимірювання спектрів ІЧ поглинання

Мета роботи: ознайомитись з фізичними основами методу спектроскопії інфрачервоного поглинання, навчитись проводити структурний аналіз хімічних сполук за спектрами ІЧ поглинання, розраховувати кількість нормальних коливань молекули.

Матеріали та обладнання: ІЧ-Фур'є спектрометр IRTracer-100, зареєстровані спектри ІЧ поглинання кількох сполук різних класів

Теоретичні відомості

Поглинання світла речовиною. Як відомо, світло – це електромагнітна хвиля. Її характеристиками є *довжина хвилі* λ і *частота* ν . Довжина хвилі, як правило, вимірюються в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} = 10 \text{ \AA}$). Швидкість поширення хвилі

$$\nu = \lambda \nu$$

Якщо електромагнітна хвиля поширюється у вакуумі, то цей вираз набуває вигляду:

$$\lambda \nu = c,$$

де c – швидкість світла у вакуумі, $3 \cdot 10^{10}$ см/с. В будь-якому іншому середовищі швидкість v відрізняється від c , і співвідношення

$$\frac{c}{v} = n$$

називають *показником заломлення* середовища.

Зазвичай частоту будь-яких коливань вимірюють у герцах ($1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$). Проте, у спектроскопії використовується величина, пропорційна частоті, – так зване хвильове число $\tilde{\nu}$. Ця величина виражає кількість довжин хвиль λ , що вкладаються в 1 см, і вимірюється в обернених сантиметрах (см^{-1}). Вона визначається як

$$\tilde{\nu}(\text{см}^{-1}) = 1/\lambda, \quad \tilde{\nu} = \nu/c.$$

Враховуючи корпускулярно-хвильовий дуалізм світла, енергія фотона (кванта світла) пов'язана з його частотою співвідношенням:

$$E = h\nu,$$

де h – стала Планка. Чим більша густина фотонів у пучку світла, тим він має більшу інтенсивність. Енергія монохроматичного пучка є добутком енергії фотона на кількість фотонів. Таким чином, знаючи частоту або хвильове число фотонів і кількість фотонів в одиниці об'єму світлового пучка, можна кількісно охарактеризувати його інтенсивність.

Інтенсивність пучка світла, що проходить через поглинальне середовище, зменшується. Це означає, що зменшується кількість фотонів у пучку, їх частота при цьому не змінюється.

Квантова механіка пояснює природу поглинання світла речовиною наступним чином. Мінімальне значення внутрішньої енергії молекула має в основному стані. Усі інші можливі стани характеризуються більш високими значеннями енергії і називаються збудженими. При переході з одного стану в інший молекула поглинає чи випромінює фотон, причому його частота підкоряється правилу Бора:

$$\nu_{mn} = \nu_{nm} = \frac{E_m - E_n}{h}.$$

Дослідження зв'язків між частотами світла, що поглинається чи випромінюється молекулами та частотами молекулярних рухів (частотами переходів між різноманітними енергетичними станами), і є основною метою спектроскопії. Вимірюючи відносну величину енергії випромінювання, що поглинається чи випромінюється молекулами, послідовно на кожній частоті (тобто за спектром випромінювання) можна отримати дані про будову молекул, їх кількість у досліджуваному зразку речовини.

Спектроскопія ІЧ поглинання. Випромінювання із хвильовими числами приблизно від 100 до 10000 см⁻¹, енергії якого достатньо для збудження коливальних та обертальних

станів молекул, лежить в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра. Поглинаючи інфрачервоне випромінювання, молекули переходять у збуджені коливальні та обертальні стани. Вимірюючи це поглинання послідовно для кожного хвильового числа в цьому інтервалі, отримують інфрачервоний спектр поглинання.

Сучасна теорія коливань молекул дозволяє, виходячи із заданої структури і силових сталих, розрахувати інфрачервоний спектр, проте зворотна задача – розрахунок структури за даним коливальним спектром – у загальному вигляді не розв'язується. Для того, щоб робити певні висновки щодо структури та складу речовини за її інфрачервоним спектром, доводиться використовувати емпіричні та напівемпіричні закономірності, і насамперед – явище *характеристичності нормальних коливань*. Явище *характеристичності нормальних коливань* полягає в близькості значень частот деяких нормальних коливань, які спостерігаються в ряді сполук із подібними елементами структури (визначеними типами зв'язків, функціональними групами, фрагментами надмолекулярної структури). Відповідні до таких нормальних коливань смуги поглинання у спектрах називаються *характеристичними смугами*, а частоти їх максимумів поглинання – *характеристичними частотами*.

Наявність характеристичних смуг в інфрачервоному спектрі обумовлена, таким чином, певними особливостями структури молекул речовини, що поглинає світло. Тому структурний аналіз за інфрачервоними спектрами зводиться до визначення характеристичних смуг поглинання та їх приналежність до відповідних структурних елементів. Мають значення також чисельне значення частот максимумів поглинання, контур (форма) та інтенсивність смуг.

Інфрачервоні спектри поглинання реєструють у вигляді залежностей, по осях абсцис яких відкладені хвильові числа (іноді довжини хвиль), а по осях ординат – величини, що характеризують інтенсивність поглинання (термін інтенсивність використовується при цьому як характеристика поглинання).

Нормальні коливання. Періодичні зміни положень атомів у молекулі без зміни положення центру мас молекули називають *нормальними коливаннями*. Розглянемо типи нормальних коливань для деяких простих молекул. Очевидно, що двохатомна молекула АВ (рис.1) може мати лише один тип коливань, у якому атоми А і В коливаються поблизу положення рівноваги, зміщуючись уздовж напрямку, що з'єднує атоми. Такі коливання атомів уздовж зв'язків між атомами називаються *валентними (stretching)*.



Рис. 1. Коливання двоатомної молекули

У випадку нелінійної молекули, що містить три (і більше) атомів, розрізняють два типи молекулярних коливань: валентні та деформаційні. Якщо валентні коливання пов'язані тільки зі зміною міжатомних відстаней, то деформаційні коливання полягають в зміні кута, утвореного зв'язками біля спільного атома. Як приклад нелінійної трьохатомної молекули розглянемо молекулу води (рис. 2). Для такої молекули існує три нормальні коливання: симетричне валентне ν_1 , деформаційне ножичне (scissoring) ν_2 і антисиметричне валентне ν_3 .

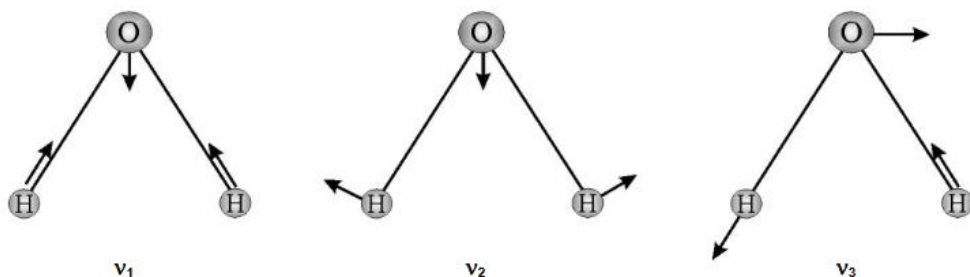


Рис. 2. Типи коливань нелінійної трьохатомної молекули

До деформаційних коливань відносять також рухи групи атомів відносно іншої частини молекули без зміщення атомів відносно один одного всередині цієї групи. Прикладом таких коливань є крутильні (twisting), маятникові (rocking) та торсіонні (torsion) деформаційні коливання.

Зі збільшенням кількості молекул в атомі кількість нормальних коливань швидко зростає. Кожний атом має 3 ступеня вільності, тому молекула, що складається з N атомів, має $3N$ ступені вільності. Віднімаючи від цієї кількості 3 ступені вільності поступального руху та 3 (2 у випадку нелінійних молекул) ступені вільності обертального руху, отримаємо для кількості коливань $3N-6$ (для лінійних молекул $3N-5$). Не обов'язково всі $3N-6$ частот коливань молекули мають бути різними. Деякі з них можуть збігатися за величиною одна з одною. Такі частоти називаються *виродженими*.

У багатоатомних молекулах, як правило, немає чисто деформаційних чи валентних коливань. Умова збереження центру мас молекули призводить до того, що ці коливання змішуються, і можна говорити лише про переважно валентні чи переважно деформаційні коливальні рухи.

Не всі фундаментальні частоти коливань проявляються в ІЧ спектрі. Активними в ІЧ спектрі будуть лише ті коливання,

при яких змінюється дипольний момент системи, тобто похідна дипольного моменту по нормальній координаті, що відповідає коливанню, є відмінною від нуля.

Завдання

1. Розглянути приклади спектрів ІЧ поглинання різних сполук, наведені нижче. Проаналізувати відповідність спостережуваних спектральних смуг різним типам нормальних коливань.

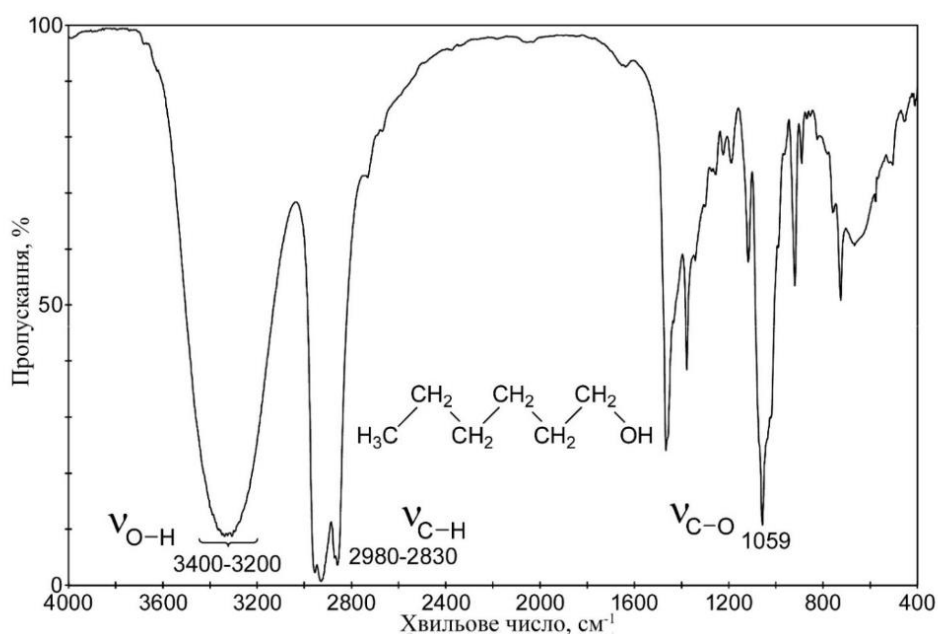


Рис. 3. Спектр ІЧ поглинання гексанолу.

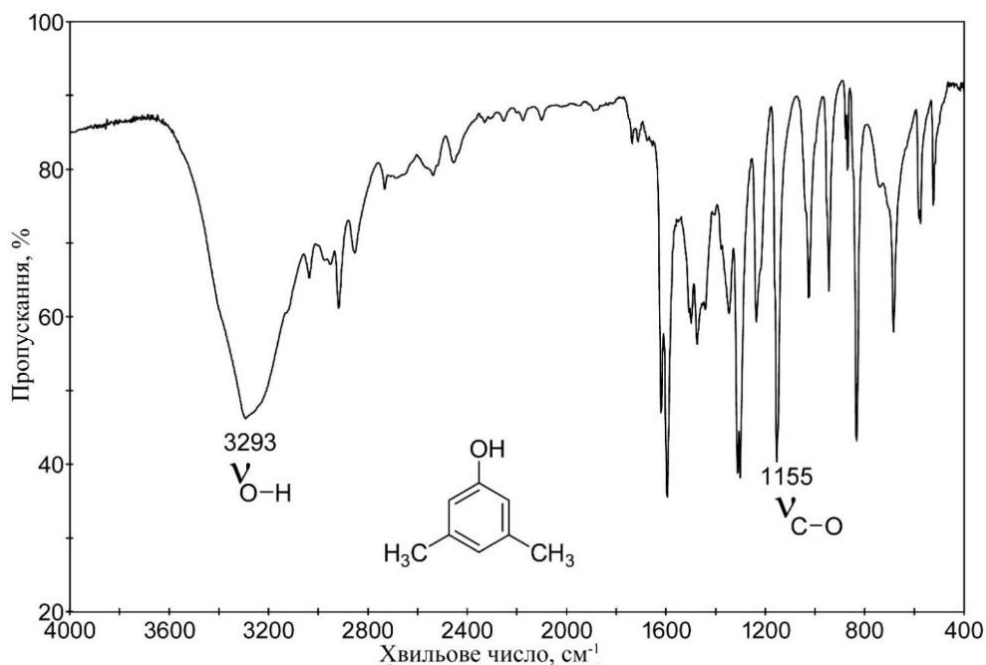


Рис. 4. Спектр ІЧ поглинання фенолу.

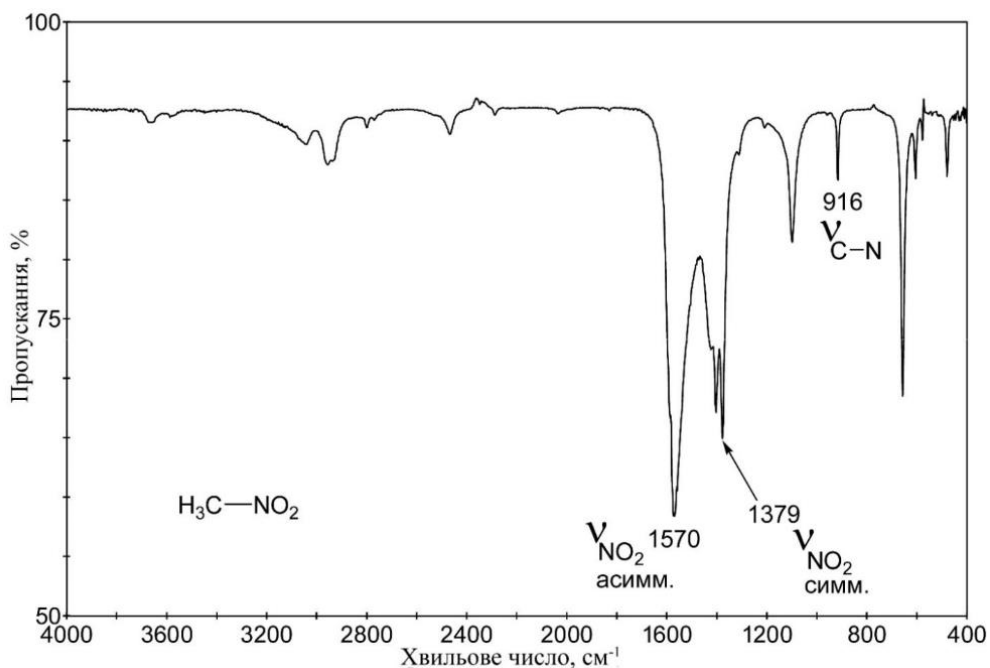


Рис. 5. Спектр ІЧ поглинання нітрогеновмісної сполуки

2. Провести структурний аналіз речовини за спектром ІЧ поглинання (рис. 6)

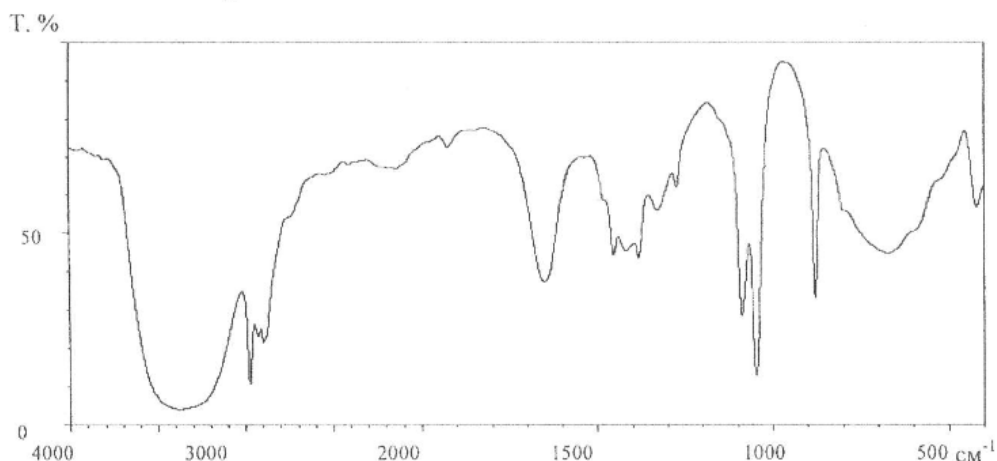


Рис. 6. Спектр ІЧ поглинання до завдання 2.

3. Розрахувати кількість нормальних коливань для молекул CH_3OH , CCl_4 , C_6H_6 .

Контрольні питання

1. Що таке хвильове число?
2. У чому полягає явище характеристичності нормальних коливань?
3. Які типи нормальних коливань вам відомі?
4. Назвіть формулу для розрахунку кількості нормальних коливань нелінійної молекули.

Лабораторна робота №2

Визначення поліетилену методом вимірювання спектрів

ІЧ поглинання

Мета роботи: на основі вимірювання спектрів ІЧ поглинання різних зразків визначити, який з них є поліетиленом.

Матеріали та обладнання: ІЧ-Фур'є спектрометр IRTracer-100, прозорі плівки різних матеріалів

Теоретичні відомості

Метод спектроскопії ІЧ поглинання є одним із найбільш потужних аналітичних методів, який часто використовується у фундаментальних і прикладних дослідженнях, пов'язаних з визначенням структури молекул або ідентифікації речовин. ІЧ спектроскопія активно використовується в таких галузях науки як хімія, фізика, біологія, фармацевтика та ін. В сучасних наукових дослідженнях найактивніше використовують ІЧ Фур'є-спектроскопію, яка є наслідком оригінального синтезу нових досягнень в оптиці, механіці, електроніці, в лазерній та обчислювальній техніці. Фур'є-спектроскопія ІЧ поглинання

(FTIR – Fourier Transform Infrared Spectroscopy) відрізняється від класичного методу відсутністю диспергуючого елемента. FTIR-спектрометри – це спектрометри другого покоління з вбудованим інтерферометром Майкельсона. Метод ІЧ Фур'є-спектроскопії поглинання та відбивання дає можливість одержати найбільш повну інформацію про будову і склад аналізованої речовини.

Головним елементом Фур'є-спектрометра є вбудований двопроменевий інтерферометр Майкельсона, принципова оптична схема якого показана на рис. 7.

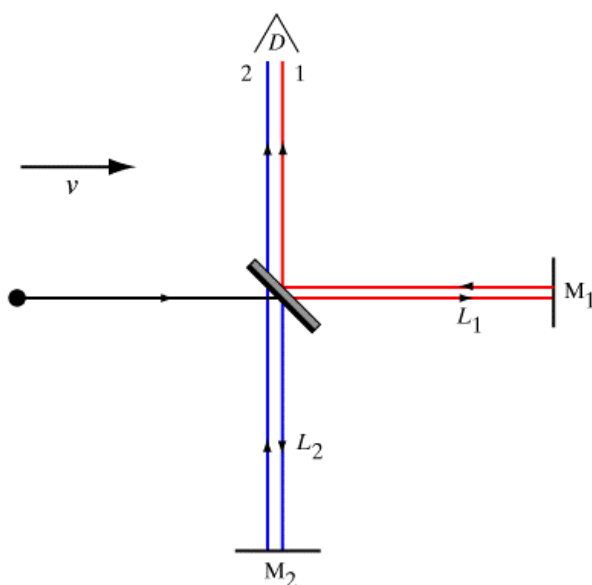


Рис. 7. Оптична схема двопроменевого інтерферометра Майкельсона

На цій схемі літерами M_1 і M_2 позначені дзеркала, одне з яких закріплене нерухомо, а інше можна переміщувати. Літерами L_1 , L_2 позначено відстані до дзеркал M_1 і M_2 , відповідно. Світловий промінь від джерела світла падає на напівпрозору пластинку під кутом 45° . Світло частково відбивається від пластинки, а частково проходить її. На певній відстані від пластинки під прямим кутом до променів встановлені дзеркала M_1 і M_2 . Частина світлового променя проходить крізь пластинку до дзеркала M_1 і відбивається від нього, проходячи при цьому шлях $2L_1$. Інша частина відбивається від пластинки, потрапляючи на дзеркало M_2 , і проходить шлях $2L_2$. Обидва промені через світлоподільну пластину потрапляють до детектора D , де відбувається їх інтерференція і отримується інтерферограма. Інтерференційна картина залежить від різниці оптичного шляху двох променів. В усіх сучасних FTIR-спектрометрах для моніторингу положення другого дзеркала використовується інтерференційна картина від монохроматичного світла, випромінюваного He-Ne лазером. В результаті зміни положення рухомого дзеркала довжина оптичного шляху відповідного променя змінюється, що призводить до модуляції інтенсивності монохроматичних компонент випромінювання. При цьому, частота модуляції однозначно визначається

довжиною хвилі. Сигнал, що виникає в цьому процесі на приймачі, є Фур'є-перетворенням від функції розподілу енергії за частотами, тобто від спектру досліджуваного випромінювання. Для отримання звичайного спектру необхідно виконати обернене Фур'є-перетворення, яке виконується комп'ютером, що і дало назву цьому методу аналізу.

Для того, щоб пов'язати зареєстрований звіт з певною величиною різниці ходу в інтерферографі, одночасно знімається випромінювання He-Ne лазера – опорна інтерферограма. Джерелом інфрачервоного випромінювання в Фур'є-спектрометрі виступає глобар, який являє собою стержень із карбіду кремнію, діаметром 5 мм і довжиною 40 мм, що нагрівається електричним струмом, який пропускається через нього, до температури 1200-1400° С. При цьому глобар випромінює в діапазоні 2-25 мкм.

Складність отримання спектрів на Фур'є-спектрометрі перекривається його перевагами над іншими спектральними приладами, які полягають в наступному:

1. У Фур'є-спектрометрі на кожний визначений момент часу отримується інформація одночасно про весь спектральний інтервал, тому за рахунок багаторазового сканування Фур'є-спектрометр має величину відношення

сигнал/шум більш високу, ніж дифракційні або призмові прилади.

2. Висока точність визначення хвильових чисел у спектрі.
3. Постійна у всьому досліджуваному спектральному діапазоні роздільна здатність.
4. Широкий діапазон досліджуваного спектра.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути спектрометр.
2. Записати фоновий спектр для режиму поглинання.
3. Вставити в тримач зразок 1 (тонка прозора плівка).
4. Записати спектр ІЧ поглинання зразка 1 (режим поглинання).
5. Вставити в тримач зразок 2 (інша прозора плівка).
6. Записати спектр ІЧ поглинання зразка 2 (режим поглинання).
7. Записати фоновий спектр для режиму пропускання.
8. Повторити кроки 3 – 6 для режиму пропускання.
9. Перенести записані спектри на власний носій.
Побудувати їх в програмі Origin.

10. Порівняти отримані спектри зі спектром поліетилену (рис. 8). Визначити (за спектрами в режимі пропускання та поглинання), який із зразків є поліетиленом.
11. Пояснити, за якими ознаками це можна визначити. Підписати відповідні колювання на отриманих спектрах.

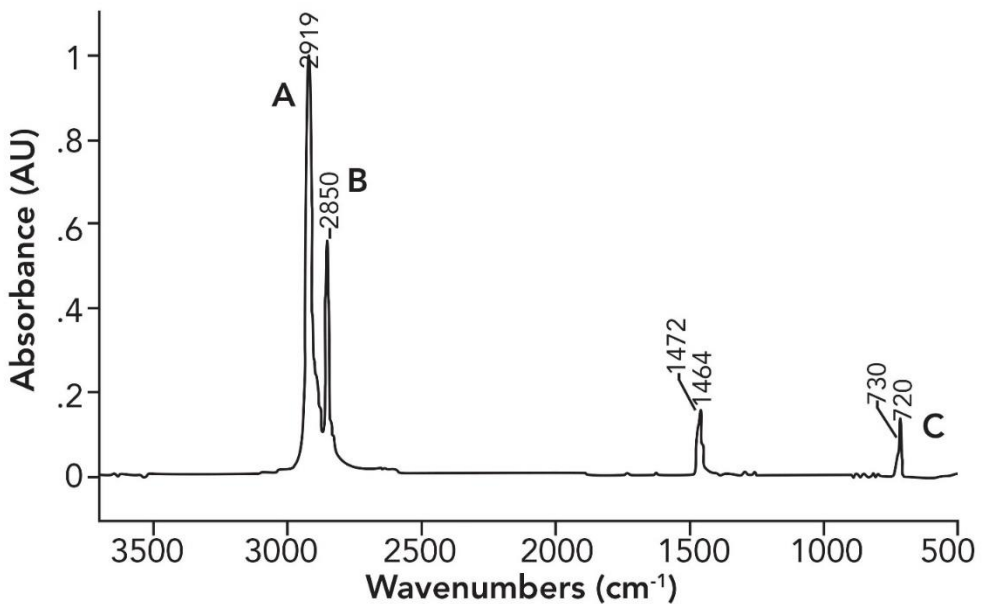


Рис. 8 Спектр ІЧ поглинання поліетилену

(А – антисиметричні валентні колювання С – Н,
В – симетричні валентні колювання С – Н, С – деформаційні
крутильні колювання групи CH_2)

Контрольні питання

1. Що є основним елементом Фур'є-спектрометра?
2. Описати принцип дії двопроменевого інтерферометра Майкельсона.
3. За рахунок чого досягається гарне співвідношення сигнал/шум у Фур'є-спектрометрах?
4. Як за зовнішнім виглядом спектру можна визначити, в якому режимі він був записаний – поглинання чи пропускання?

Лабораторна робота №3

Прояви особливостей структури рідин з міжмолекулярним водневим зв'язком в спектрах ІЧ поглинання

Мета роботи: ознайомитись з поняттям водневого зв'язку та його проявами в коливальних спектрах, навчитись визначати фазовий стан речовин з міжмолекулярним водневим зв'язком за спектрами ІЧ поглинання

Матеріали та обладнання: ІЧ-Фур'є спектрометр IRTracer-100, зареєстровані спектри ІЧ поглинання пропанолу в різних фазових станах

Теоретичні відомості

Речовини з атомом водню, що взаємодіє з двома атомами тієї самої молекули або атомами двох різних молекул (вода, спирти, феноли), мають певні характерні особливості. Наприклад, в конденсованій фазі молекули таких речовин здатні до утворення асоціатів, що в подальшому призводить до зростання температур кипіння та плавлення. Крім цього, мають місце певні аномальні зміни розчинності, тиску насичених парів та ін. Важливо відмітити, що подібна поведінка властивостей речовин є характерною саме для

речовин з функціональними групами OH та NH. Якщо ж замінити в таких групах атом водню на будь-який інший елемент, то аномальні властивості зникнуть, крім того зникнуть і асоціати. З чого можна прийти до висновку, що атом водню, пов'язаний із атомом кисню, крім цього, утворює зв'язок і з атомом сусідньої молекули або ж з іншою функціональною групою цієї ж молекули.

Такий вид взаємодії називають водневим зв'язком, і він є частинним випадком проявів міжмолекулярних взаємодій. Схематично водневий зв'язок представляють наступним чином:



Атоми A і B – це, здебільшого, електронегативні атоми O, N, F, Cl, S, у випадку, коли мова іде про внутрішньомолекулярні водневі зв'язки, на місці атома B можуть бути атоми Br та I. При наявності водневого зв'язку відстань між атомом A та атомом B значно менша в порівнянні з випадком, коли водневого зв'язку немає.

Виділяють два типи водневих зав'язків: внутрішньомолекулярні та міжмолекулярні зв'язки, причому останні класифікують як водневі зв'язки середньої міцності (між нейтральними молекулами) та сильні іонні водневі зв'язки. Саме завдяки водневим зв'язкам середньої міцності

(«нейтральні» водневі зв'язки) в спиртах в рідкій фазі утворюються асоціати – циклічні та ланцюгові кластери. Окрім спиртів, цей тип зав'язків є характерним для фенолів, амінів, амідів та карбонових кислот.

Наявність водневого зв'язку яскраво проявляється в коливальних спектрах, причому зміни частоти, інтенсивності та ширини спектральних смуг валентних коливань О – Н зв'язку несуть інформацію про наявні асоціати. Смути валентних коливань О–Н та їх обертонів є найбільш чутливими до формування водневого зв'язку, тому що Н-зв'язок призводить до значних змін у геометричній, спектроскопічній та фізичній поведінці перш за все цієї групи. Смути цього коливання зміщується в короткохвильовий бік. При цьому спостерігається її розширення та збільшення інтенсивності. Характеристична частота валентних коливань групи О-Н складає приблизно $3650\text{--}3750\text{ см}^{-1}$, причому значення частоти близькі для різних речовин (спирти, вода, кислоти, феноли), в складі яких є ОН група. В спектрах конденсованої фази ширина смуги ОН зв'язку сильно зростає, причому напівширина суттєво змінюється в залежності від речовини. Наприклад, в метиловому спирті вона складає приблизно 350 см^{-1} . Крім того, максимум смуги помітно зсувається відносно відповідної смуги в газовій фазі.

Завдання

1. Розглянути спектри ІЧ поглинання пропанолу на рис. 9 і 10 (зразки 1 і 2, відповідно), знайти смугу, що відповідає валентним коливанням групи ОН. Визначити її положення та ширину.
2. Визначити, який із двох зразків є пропанолом в рідкому стані, а який – в газоподібному. Висновки обґрунтуйте.

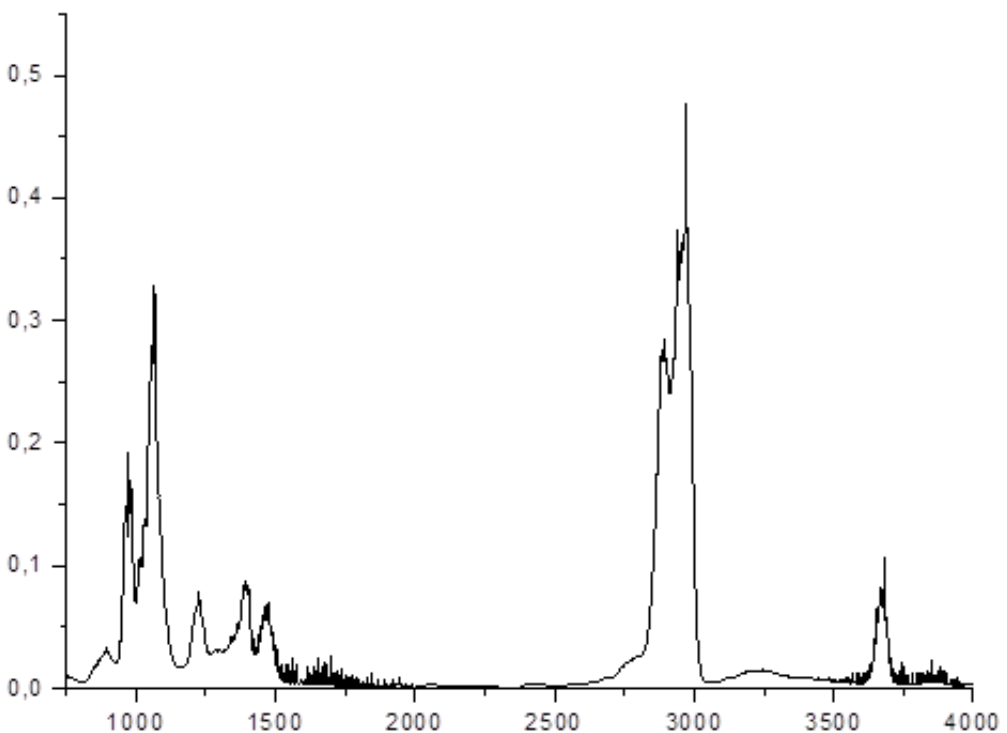


Рис. 9 Спектр ІЧ поглинання пропанолу. Зразок 1.

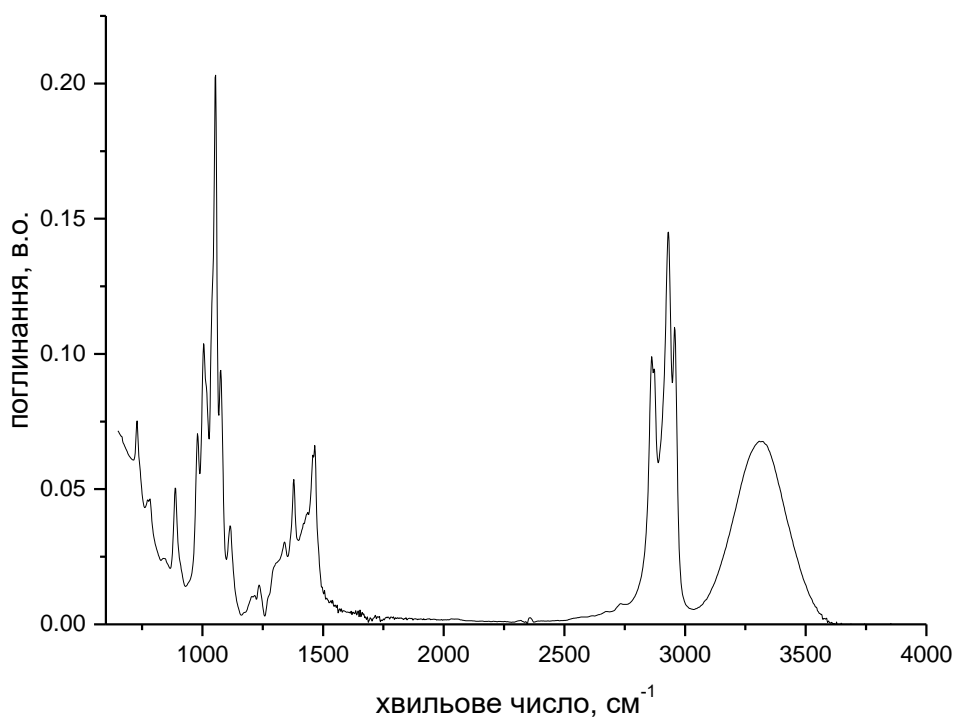


Рис. 10 Спектр ІЧ поглинання пропанолу. Зразок 2.

3. Визначити, яким коливанням належать інші смуги у спектрі, та чи впливає на їх положення та форму наявність водневого зв'язку.

Контрольні питання

1. Дайте визначення водневого зв'язку.
2. Назвіть спектроскопічні прояви водневого зв'язку.

Лабораторна робота №4

Спектральні властивості амінокислоти триптофану

Мета роботи: зареєструвати спектр оптичного поглинання триптофану, дослідити спектральні властивості триптофану

Матеріали та обладнання: спектрофотометр, водний розчин триптофану, зразки триптофану у вигляді плівок

Теоретичні відомості

Білки — високомолекулярні полімери, кожен з яких характеризується індивідуальною амінокислотою послідовністю, що визначає їх функції. Так, наприклад, регуляторні білки регулюють біосинтез білків в клітині, а за допомогою рецепторних білків, що містяться зовні мембрани, клітина сприймає інформацію про оточуюче середовище та різні регуляторні сигнали. Транспортні білки (людський альбумін та гемоглобін) беруть участь в транспорті іонів, ліпідів, цукрів та амінокислот через біологічну мембрану. Захисні системи вищих організмів формуються завдяки таким білкам, як імуноглобулін (відповідає за імунітет), інтерферон (протівірусний білок), тромбін (відповідає за згортання крові) та ін. Можливості

використання модифікованих форм білків для різних цілей, наприклад, збільшення ефективності дії протівірусних та протипухлинних ліків на основі білків представляють значний науковий інтерес.

За складом білки поділяються на прості (містять лише амінокислоти) та складні (до складу яких входять іони металів чи пігменти). Білок може складатися з одного чи кількох ланцюгів, які містять від 50 до кількох сотень амінокислотних залишків. Амінокислоти зв'язуються між собою за допомогою амідних або пептидних зв'язків —CO—NH— .

У природі існує 20 основних амінокислот, які і визначають тип білка та його функції. Лише 3 амінокислоти містять в своєму складі π -електронмісткі системи – фенілаланін (Phe), тирозин (Tyr) та триптофан (Trp) (рис. 11.). Саме ці три ароматичні амінокислоти являються оптичними центрами відповідальними за поглинання, флюоресценцію та фосфоресценцію білкових макромолекул.

Так, наприклад, білок людський альбумін (НА) складається з 585 амінокислот. Причому, кожна молекула НА містить ароматичні амінокислоти в такому співвідношенні: 1 триптофан, 31 фенілаланін та 18 тирозин.

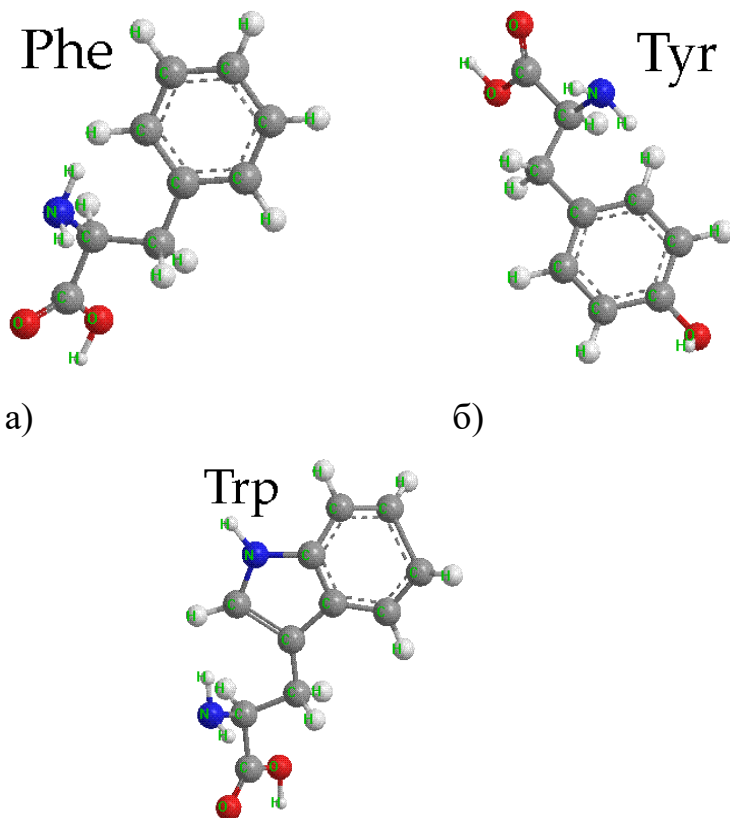


Рис. 11. Ароматичні амінокислоти: а) фенілаланін,
 б) тирозин, в) триптофан.

Незважаючи на невелику кількість ароматичних амінокислот у білках, вони дають багато інформації за рахунок чутливості до конформаційних станів, оточення білків. Конформація білка визначається амінокислотою послідовністю, та стабілізуються водневими зв'язками між пептидними та боковими групами амінокислотних

залишків, а також гідрофобними та електростатичними взаємодіями.

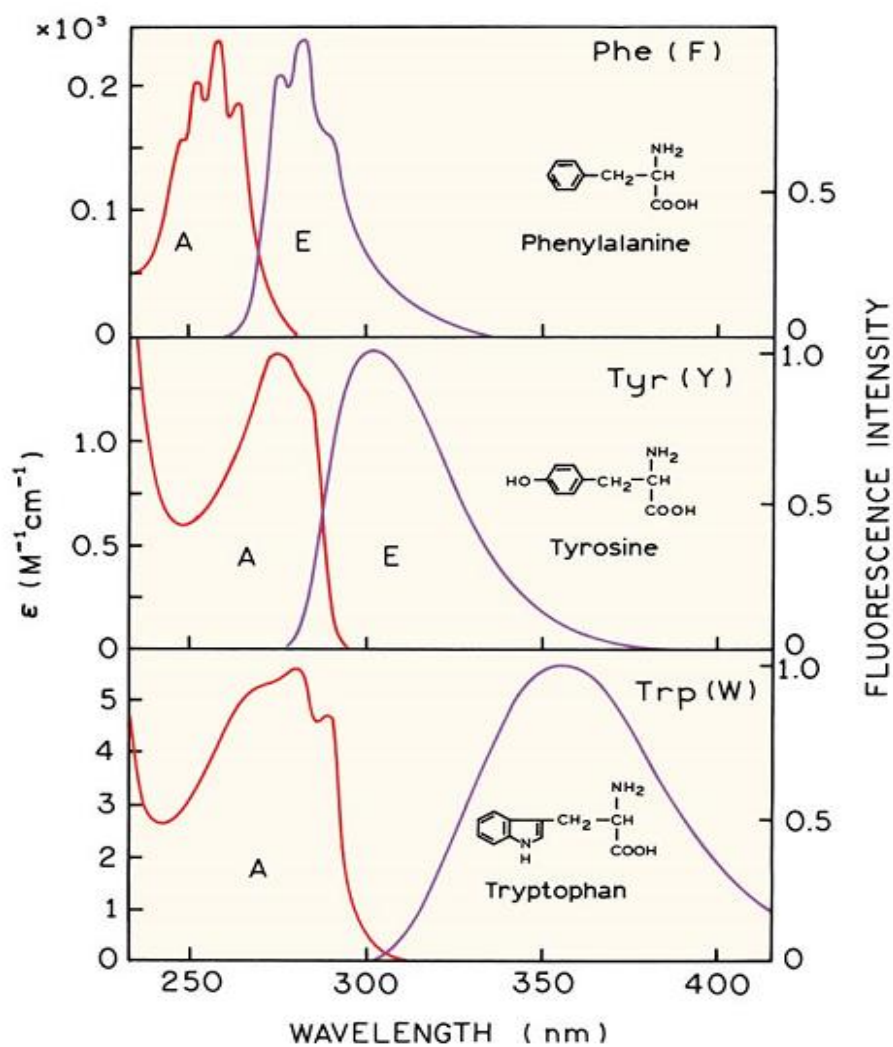


Рис. 12. Спектри випромінювання та поглинання ароматичних амінокислот рН7 у водному розчині [8].

Спектральні властивості та перебіг фотофізичних процесів білків визначаються особливостями електронної структури їх амінокислот. Важливу роль відіграє наявність π -електронмістких систем у амінокислотах (триптофан (Trp), тирозин (Tyr) та фенілаланін (Phe)).

Завдання

1. Провести вимірювання спектрів поглинання триптофану у водному розчині та плівках, побудувати спектр.
2. Для знаходження максимумів поглинання спектрів плівок в області 250 – 300 нм (рис. 13), провести розклад піків на компоненти у програмі PeakFit, для довідки можна скористатись відеоінструкцією за посиланням <https://youtu.be/wQV3G8ll0bs>.
3. Для пояснення природи поглинання спектру триптофану провести розрахунки електронної будови та електронних переходів молекули триптофану у програмі Gaussian (метод бажано підібрати, такий, для якого матиме місце найбільше узгодження з експериментальними даними для електронних переходів). Побудувати електронні рівні, форми молекулярних орбіталей для 6 молекулярних орбіталей в області енергетичної щілини. Навести характеристики електронних переходів.

4. Провести аналогічні розрахунки для амінокислоти неароматичного типу (без замкнених циклів у будові) на вибір і порівняти з розрахунками для триптофану.

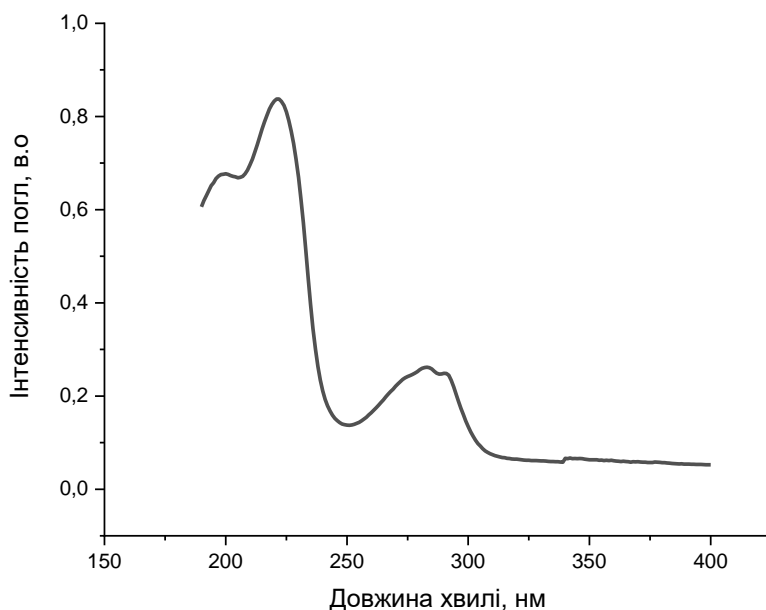


Рис. 3. Спектр поглинання плівки триптофану, підкладинка – кварц.

Література

1. Л.А. Булавін, О.Ю. Актан, Ю.Ф. Забашта, С.М. Перепелиця, О.С. Свечнікова, С.П. Сенчуров. Медична фізика. Т. 2. Експеримент у медичній фізиці. – К.: ВПЦ «Київський університет». – 2011. – 312 с.
2. Kuhn L.P. The hydrogen bond. I. Intra- and intermolecular hydrogen bonds in alcohols / Kuhn L.P. // J. Am. Chem. Soc. – 1952. – V.74. – P. 2492-2499.
3. Дорошенко І., Погорелов В., Чернолевська Є. Агрегація молекул в рідких спиртах: коливальна спектроскопія і комп'ютерне моделювання // Вісник Київського національного університету. Фізика. – 2010.- № 10-11. – С. 43-45.
4. Iryna Doroshenko. Clustering processes in monohydric alcohols. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, Germany. - 2015. – 74 p.
5. Lacowich J.R. Protein Fluorescence / J.R. Lacowich // Topics in fluorescence Spectroscopy – 2000 – Vol.6 – 310p.
6. Pharmacokinetic and pharmacodynamics studies of a human serum albumin-interferon- α fusion protein in cynomolgus monkeys / B.Osborn, H.Olsen, B.Nadelli [et. al.] // JPET – 2002. – Vol.303. – P.540-548.

7. Peters T. All about Albumin. Biochemistry, Genetics, and Medical application / Theodore Peters, - Academic Press, 1996. – 432p.
8. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук Левченко С.М. «Особливості спектральних властивостей РНК». К.-2011.