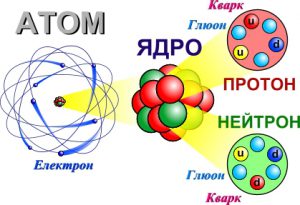
**Св́ітло** — **електромагнітні хвилі** видимого спектру. До видимого діапазону належать **електромагнітні хвилі** в інтервалі частот, що **сприймаються** людським **оком** (7.5×1014 — 4×1014 Гц), **тобто** з **довжиною хвилі** від 390 до 750 нанометрів.

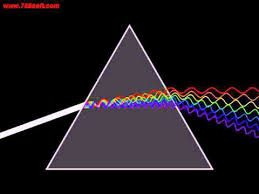
****

**Фото́н** (від [дав.-гр.](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D1%8C%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B5%D1%86%D1%8C%D0%BA%D0%B0_%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%B0) φῶς, [род. відм.](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%BE%D0%BA) φωτός, «світло») — [квант](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82) [електромагнітного випромінювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B5_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%96%D0%BD%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F) (у вузькому розумінні — [світла](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D1%96%D1%82%D0%BB%D0%BE)), [елементарна частинка](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%BD%D0%B0_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B0), що є носієм [електромагнітної взаємодії](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B0_%D0%B2%D0%B7%D0%B0%D1%94%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D1%96%D1%8F).

Це [безмасова частинка](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%B7%D0%BC%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D1%96_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B8), яка здатна існувати у вакуумі тільки рухаючись зі [швидкістю світла](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D0%B2%D0%B8%D0%B4%D0%BA%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%D0%BB%D0%B0). [Електричний заряд](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4) фотона також дорівнює нулю. Фотон може перебувати лише у двох спінових станах з проекцією [спіна](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D1%96%D0%BD) на напрямок руху ([спіральністю](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D1%96%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D0%B8)) ±1. У фізиці фотони позначаються літерою γ.

**Св́ітло** — [електромагнітні хвилі](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B0_%D1%85%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%8F) [видимого спектра](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B5_%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%D0%BB%D0%BE).

**Хвильова оптика**



**Зміст**                                                                   стор.

***Тема 5.3. Хвильова оптика.***

§27. Загальні відомості про хвилі.                                                                      163

§28. Про відчуття кольору та про те, чому навколишній

світ різнобарвний.                                                                                                  168

§29. Інтерференція світла.                                                                                    174

§30. Застосування інтерференції. Інтерферометри.

Просвітлення оптики.                                                                                            183

§31. Дифракція світла. Дифракційна решітка.                                                 189

§32. Поляризація світла.                                                                                        197

§33. Дисперсія світла.                                                                                             201

§34. Види спектрів. Спектральний аналіз.                                                        208

§35. Шкала електромагнітних хвиль.                                                                 215

**Тема 5.3.   Хвильова оптика.**

**Хвильова оптика**, це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлових (електромагнітних) хвиль і в якому вивчають та пояснюють ті явища, що підтверджують цей факт.

**§27. Загальні відомості про хвилі.**

Про суть того що називають хвилями, про параметри та властивості хвиль, ми  говорили в процесі вивчення розділу “Механіка”. Тому на разі просто стисло згадаємо раніше вивчений матеріал та доповнимо його загальними відомостями про світло, як потік певних електромагнітних хвиль.

**Хвилею**називають процес розповсюдження збурення матеріального середовища (речовини або поля), який супроводжується переносом енергії, але не супроводжується переносом самого середовища (частинки середовища або параметри поля, лише здійснюють певні гармонічні коливання).

В загальному випадку, хвилі поділяються на механічні та електромагнітні. **Механічними**(або **пружними**) називають такі хвилі, які розповсюджуються в пружному середовищі і які представляють собою взаємопов’язані коливання частинок цього середовища.  До числа механічних хвиль відносяться звукові хвилі, поверхневі хвилі (хвилі на поверхні рідини), сейсмічні хвилі, ударні хвилі вибухів і взагалі будь які пружні хвилі що розповсюджуються в твердих, рідких та газоподібних середовищах.

**Електромагнітними**називають такі хвилі, які розповсюджуються в електромагнітному полі і які представляють собою взаємопов’язані  коливання параметрів цього поля. До числа електромагнітних хвиль відносяться: радіохвилі, видиме світло, інфрачервоне, ультрафіолетове, рентгенівське та гамма випромінювання.

В залежності від того, як коливання частинок середовища (або параметрів поля), орієнтовані відносно напрямку розповсюдження хвилі, хвилі поділяються на поздовжні, поперечні та поздовжньо-поперечні. Наприклад звукові хвилі є поздовжніми, тобто такими, в яких коливання частинок пружного середовища відбуваються вздовж напрямку розповсюдження звуку. Електромагнітні хвилі (в тому числі і світлові) є поперечними, тобто такими, в яких коливання векторів напруженості електричного поля (**Е**) та індуктивності магнітного поля (**В**) відбуваються в площині, що є перпендикулярною (поперечною) до напрямку розповсюдження хвилі.

Основними засобами графічного зображення хвиль є фронт хвилі та хвильовий промінь. **Фронтом хвилі** (хвилевою поверхнею) називають таку умовну лінію (поверхню), в кожній точці якої частинки (мікро фрагменти) хвилі мають однакову фазу коливань, тобто знаходяться на одній і тій же стадії коливального процесу. **Хвильовим променем** (променем) називають таку умовну лінію, яка вказує на напрям розповсюдження хвильового збурення. Хвильовий промінь є перпендикулярним до фронту відповідної хвилі.

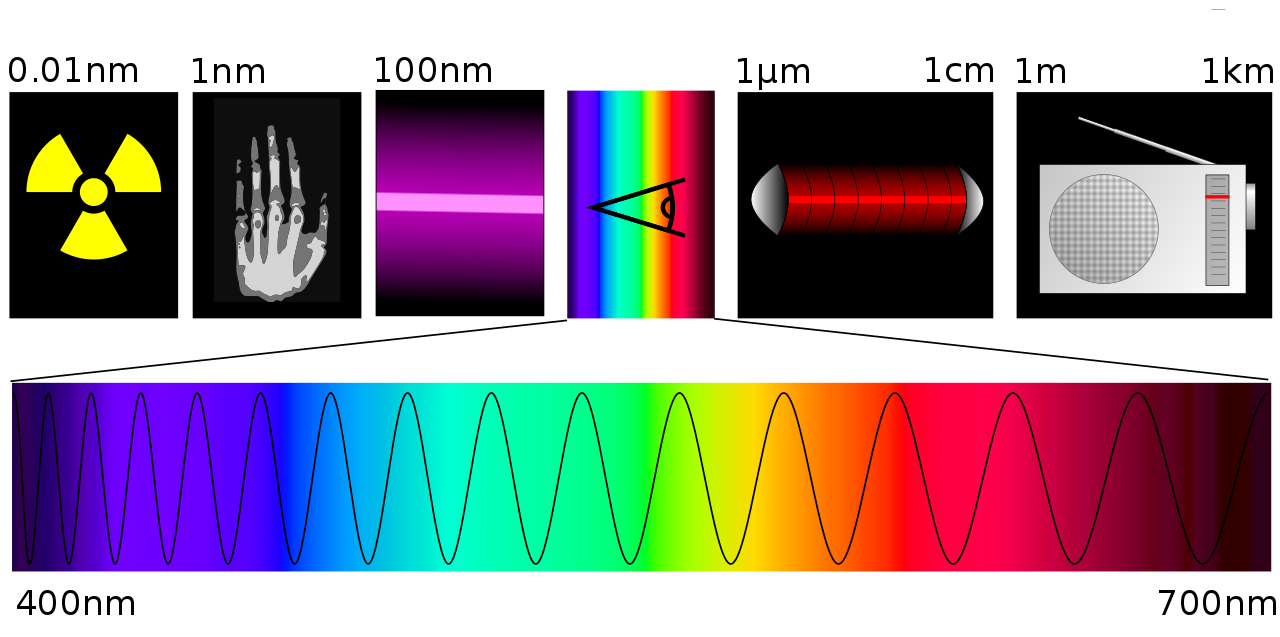
На відміну від коливань, хвилі характеризуються подвійною періодичністю. З одного боку, кожна частинка хвилі здійснює певні гармонічні коливання, параметри яких можна охарактеризувати відповідним набором фізичних величин: період коливань (Т), частота коливань (ν), амплітуда коливань (хм), фаза коливань (φ). З іншого боку, взаємопов’язані коливання частинок середовища (параметрів поля) мають певну просторову повторюваність (періодичність). Характеризуючи цю просторову повторюваність говорять про довжину хвилі.

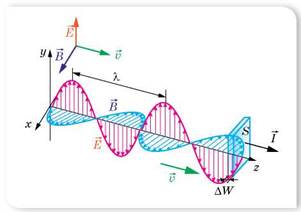
**Довжина хвилі**– це фізична величина, яка характеризує просторову періодичність (повторюваність) хвильового процесу і яка дорівнює тій відстані на яку розповсюджується хвильове збурення за той проміжок часу що дорівнює періоду коливань частинок даної хвилі.

Позначається: λ

Визначальне рівняння: λ = vT , де v – швидкість розповсюдження хвилі

Одиниця вимірювання: [λ] = м   (метр).



**Довжина́ хви́лі** — характеристика періодичної [хвилі](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%8F), що позначає найменшу відстань між точками [простору](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%D1%80), в яких хвиля має однакову [фазу](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B7%D0%B0_(%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F))[[1]](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BE%D0%B2%D0%B6%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D1%85%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D1%96#cite_note-1). Крива на представленому малюнку може розглядатися, наприклад, як миттєвий знімок [збурень у струні](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%B1%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BD%D0%B8),

Хвилю можна не лише побачити, намалювати чи описати певним набором слів та величин, а й представити у вигляді певної математичної формули. Формула яка описує поведінку тих частинок речовини (тих параметрів поля), взаємопов’язані коливання яких утворюють відповідну хвилю, і яка дозволяє визначати параметри будь якої з цих частинок в будь який момент часу, називається **рівнянням хвилі.** Наприклад, механічну хвилю утворюють взаємопов’язані коливання частинок речовини, поведінка яких описується їх координатою (х). Тому рівнянням механічної хвилі є формула, яка  відображає залежність координати (х) довільно взятої точки хвилі, від часу (t) та тих незмінних величин, які характеризують коливальні рухи частинок хвилі: амплітуда коливань (хм), частота коливань (ν), довжина хвилі (λ). При цьому, в загальному випадку рівняння хвилі має вигляд  х=хмsin2π(νt – l/λ),  де  l – відстань від джерела хвиль до заданої точки.

При взаємодії хвиль з іншими фізичними об’єктами (в тому числі з іншими хвилями) та при їх переході з одного середовища в інше, можуть  відбуватись ті чи інші хвильові явища. До числа найбільш відомих хвильових явищ відносяться: відбивання хвиль, заломлення хвиль, інтерференція хвиль та дифракція хвиль.

**Відбивання хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що на межі двох різних середовищ, хвильове збурення змінюючи напрям свого розповсюдження, повертається в попереднє середовище і продовжує розповсюджуватись в ньому. Відбивання хвиль відбувається згідно з законом який називається законом відбивання хвиль.

Дослідження показують, що хвилі відбиваються як від більш густого, так і від менш густого середовища. При цьому, відбивання хвиль від більш густого середовища відбувається з втратою напівхвилі, а від менш густого – без втрати напівхвилі. Це означає, що та хвиля яка відбивається від більш густого середовища, після відбивання розповсюджується в протифазі відносно падаючої хвилі. А хвиля відбита від менш густого середовища, розповсюджується в тій же фазі що і падаюча хвиля.

**Заломлення хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що на межі двох різних середовищ хвильове збурення, проникаючи в нове середовище змінює напрям свого розповсюдження. Змінює тому, що в різних середовищах швидкість хвиль є різною. Заломлення хвиль відбувається згідно з законом який називається законом заломлення хвиль.

Дослідження показують, що в незалежності від того, в якому напрямку відбувається заломлення хвиль, воно відбувається без втрати напівхвилі. Крім цього, потрібно мати на увазі, що в процесі заломлення хвиль, період і частота їх коливань залишаються незмінними, тоді як довжина хвилі змінюється. Наприклад, при переході світлової хвилі з повітря в скло (n=1,52), її довжина в 1,52 рази зменшується, а при зворотньому переході – в 1,52 рази збільшується.

Експериментальні факти вказують на те, що хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної. Незалежно в тому сенсі, що при взаємодії (накладанні) різних хвиль, індивідуальні властивості та параметри кожної з них зберігаються. Наприклад, коли грає оркестр, то звуки від кожного його інструменту доходять до слухача такими, ніби грає тільки цей інструмент. Або, наприклад, коли кожна радіостанція, кожна телевізійна станція та кожний мобільний телефон, постійно посилають в навколишній простір свої радіохвилі, то ці хвилі розповсюджуються так, ніби працює лише ця радіостанція, лише цей телеканал, лише цей мобільний телефон.

Закон, який констатує факт того, що хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної і що їх результуюча дія визначається як сума дій кожної окремої хвилі, називається**принципом суперпозиції хвиль.**

За певних умов (за умови когерентності хвиль), результатом накладання хвиль може бути стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, чергується з їх послабленням в інших місцях. Цю картинку називають інтерференційною, а відповідне явище – інтерференцією хвиль. **Інтерференція хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що при накладанні когерентних хвиль, спостерігається стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших місцях. **Когерентними**(узгодженими), називають такі хвилі, які мають однакові параметри періодичності (Т, ν, λ), однакову площину коливань та незмінну різницю фаз.

Характеризуючи здатність хвиль заходити в область геометричної тіні перешкоди, а простіше кажучи – їх здатність огинати перешкоди, говорять про дифракцію хвиль. **Дифракція**, це явище, суть якого полягає в тому, що в процесі свого розповсюдження, хвилі заходять в область геометричної тіні тієї перешкоди що зустрічається на їх шляху (огинають перешкоди). Дифракція хвиль пояснюється тим, що частинки середовища (параметри поля) є взаємопов’язаними і що тому, в процесі розповсюдження хвилі, енергетичне збурення середовища неминуче розповсюджується у всіх можливих напрямках, в тому числі і тих які знаходяться в області геометричної тіні перешкоди. Крім цього, певні прояви дифракції пояснюються взаємодією хвилі з самою перешкодою.

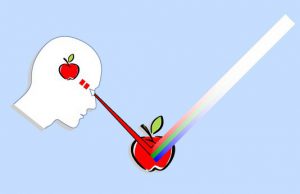
До числа безумовно важливих хвильових явищ, відноситься і ефект Доплера. **Ефект Доплера**, це явище, суть якого полягає в тому, що частотні параметри звукових, електромагнітних та інших хвиль, певним чином залежать від швидкості та напрямку руху як джерела цих хвиль, так і того спостерігача який їх фіксує. Зокрема, при взаємному наближенні джерела хвиль та спостерігача, частота хвиль збільшується, а при їх взаємному віддаленні – зменшується.

Якщо ж говорячи про ті хвилі які є предметом вивчення хвильової оптики і які називають видимим світлом, то про них можна сказати наступне.

**Видиме світло** – це потік електромагнітних хвиль, які викликають у людини зорові відчуття і довжини яких знаходяться в межах від 380нм до 760нм. При цьому кожній довжині хвилі видимого світла відповідає певний колір зорових відчуттів людини. Спектр цих кольорів умовно розділяють на сім основних кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий. Зазвичай, видиме світло є результатом інтенсивного теплового руху заряджених частинок, або тих процесів які відбуваються в енергетично збуджених атомах та молекулах.

**Таблиця відповідності частот електромагнітного випромінювання та кольорів**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Колір** | **Діапазон довжин хвиль, нм** | **Діапазон частот, ТГц** | **Діапазон енергії фотонів, еВ** |
| [Фіолетовий](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D1%96%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%80) | 380—440 | 790—680 | 2,82—3,26 |
| [Синій](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D1%96%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%80) | 440—485 | 680—620 | 2,56—2,82 |
| [Блакитний](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%80) | 485—500 | 620—600 | 2,48—2,56 |
| [Зелений](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%80) | 500—565 | 600—530 | 2,19—2,48 |
| [Жовтий](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%96%D0%BE%D0%B2%D1%82%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%80) | 565—590 | 530—510 | 2,10—2,19 |
| [Помаранчевий](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%87%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%80) | 590—625 | 510—480 | 1,98—2,10 |
| [Червоний](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B5%D1%80%D0%B2%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%80) | 625—740 | 480—405 | 1,68—1,98 |

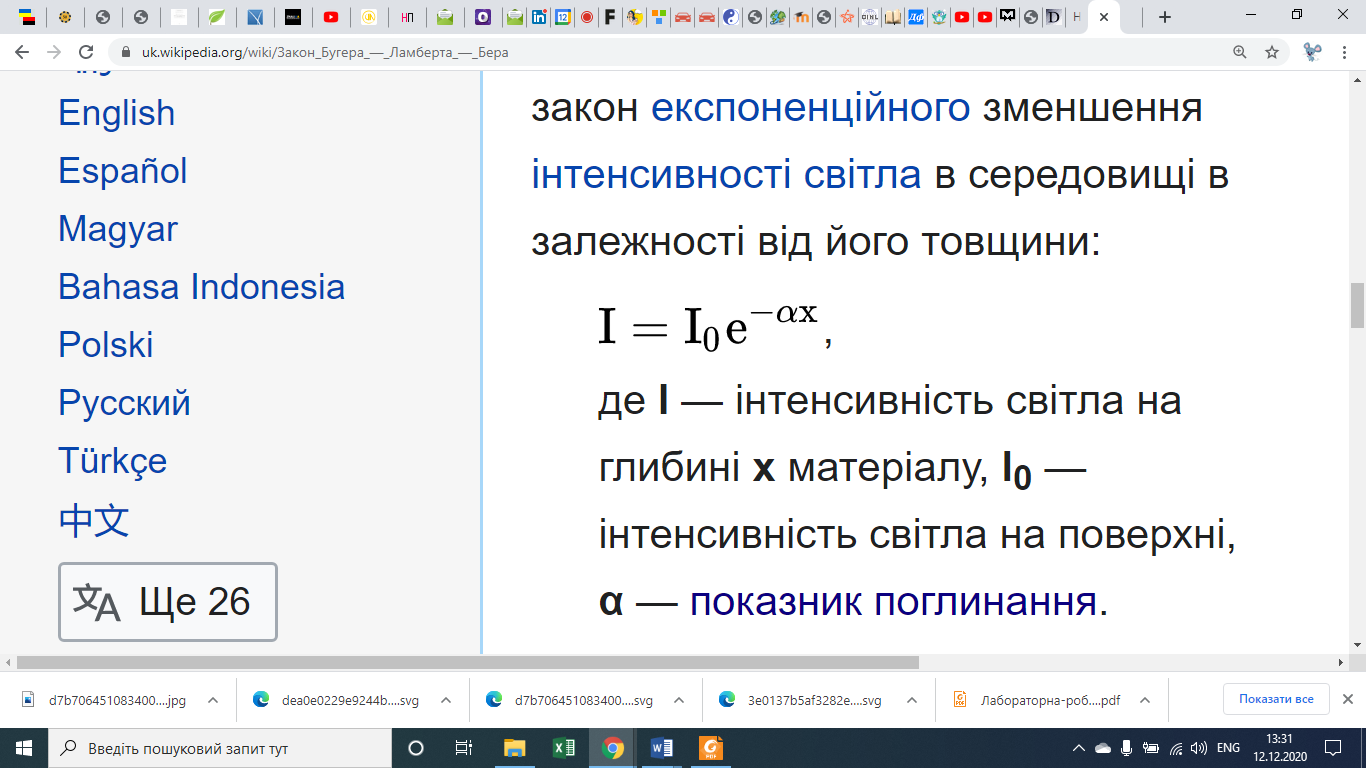


Чисельно коефіцієнт поглинання дорівнює відношенню [потоку випромінювання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%BA_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%96%D0%BD%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F) Ф, поглиненого тілом, до потоку випромінювання Фо, що впав на тіло

α= Ф/Фо

При розпосюдженні світла в середовищі, енергія поглинута в тонкому шарі, пропорційна інтенсивності випромінювання I, яка падає на цей шар, і товщині шару dx. Таким чином інтенсивність при проходженні випромінювання крізь шар зменшується на величину

**Закон Бугера — Ламберта — Бера** — закон [експоненційного](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D1%84%D1%83%D0%BD%D0%BA%D1%86%D1%96%D1%8F) зменшення [інтенсивності світла](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%96%D1%81%D1%82%D1%8C_%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%D0%BB%D0%B0) в середовищі в залежності від його товщини:



де **I** — інтенсивність світла на глибині **x** матеріалу, **I0** — інтенсивність світла на поверхні, **α** — [показник поглинання](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F).

[Абсорбанс](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B1%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B1%D0%B0%D0%BD%D1%81) (A) пучка монохроматичного випромінення в гомогенному ізотропному середовищі є пропорційним до довжини абсорбційного шляху (**l**) та концентрації (**с**) (в газовій фазі — до тиску) абсорбуючих частинок:

A= ε c l**,**

де константа **ε** — молярний коефіцієнт абсорбції (дм3моль-1см-1).

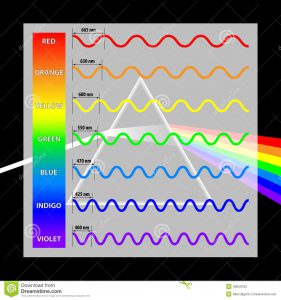
Закон носить назву, пов'язану з іменами німецьких фізиків [Августа Бера](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D0%B3%D1%83%D1%81%D1%82_%D0%91%D0%B5%D1%80), [Йоганна Ламберта](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%99%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D0%BD_%D0%93%D0%B5%D0%BD%D1%80%D1%96%D1%85_%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82) та французького астронома [П'єра Бугера](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%27%D1%94%D1%80_%D0%91%D1%83%D0%B3%D0%B5%D1%80).

# ФОТОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ

**ФОТОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ** — група методів аналізу, що базуються на вимірюванні пропускання, поглинання або розсіювання світла досліджуваною речовиною. Ці методи поділяються на декілька груп: колориметрія — побудована на візуальному порівнянні забарвлень розчинів різних концентрацій за допомогою нескладних приладів; фотоколориметрія — на вимірюванні поглинання немонохроматичного світла, яке проходить крізь розчин за допомогою приладів, які називають фотоелектроколориметрами (немонохроматичне випромінювання з вузьким діапазоном довжини хвиль одержують за допомогою світлофільтрів); спектрофотометрія — аналіз за вибірковим поглинанням розчинами монохроматичного випромінювання в УФ-, видимій та ІЧ-ділянках спектра з використанням спектрофотометрів; флуориметрія — ґрунтується на вимірюванні інтенсивності флуоресценції досліджуваних речовин, яка виникає під впливом електромагнітного випромінювання; турбідиметрія — вимірювання інтенсивності світла, яке поглинається суспензією твердої речовини; нефелометрія — вимірювання інтенсивності світлового потоку, що розсіюється диспергованими частками під певним кутом.

До Ф.а. також відносять атомно-абсорбційний аналіз, фотометрію полум’я і спектроскопію відбиття. Методи, що базуються на вибірковому поглинанні електромагнітного випромінювання в ІЧ-, видимій і УФ-ділянках молекулами досліджуваної речовини або її сполуки з відповідним реагентом, відносять до молекулярно-абсорбційного Ф.а.: візуальна колориметрія, фотоколориметрія, спектроскопія. Для розбавлених розчинів (с ≤0,01 М) у випадку монохроматичного випромінювання виконується закон Бугера — Ламберта — Бера, згідно з яким оптична густина прямо пропорційна концентрації речовини в розчині (див. *Спектрофотометрія*).

Оптичні методи аналізу нерозривно пов’язані з використанням сучасних приладів різної складності, що підвищує вартість аналізу, але дає деякі переваги порівняно з класичними хімічними методами: експресність, нерушійність зразків, простоту методик, використання невеликої кількості речовини для аналізу, можливість аналізувати сполуки будь-якої природи, проведення експрес-аналізу багатокомпонентних сумішей. Також вони підвищують чутливість, точність і відтворюваність результатів визначень.



Мал.97. Видиме світло – це потік електромагнітних хвиль довжини яких знаходяться в межах від 380нм до 760нм.

Потрібно зауважити, що чутливість людського зору до світлових хвиль гранично малих та гранично великих довжин є мізерно малою. Тому за нормальних умов освітлення, реально видимими є ті хвилі, які знаходяться в межах від 400нм  до 750нм.

**Контрольні запитання**

1.Чим схожі та чим відрізняються механічні і електромагнітні хвилі?

2. Які хвилі називають поздовжніми, а які поперечними?

3. Що називають фронтом хвилі? Хвилевим променем?

4. Що мають на увазі коли говорять про подвійну періодичність хвилі?

5. В чому суть інтерференції хвиль? за яких умов вона відбувається?

6. Які хвилі називаються когерентними?

7. В чому суть дифракції хвиль, та чому вона відбувається?

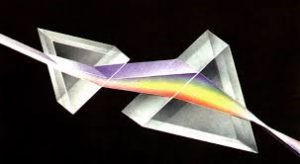
8. В чому суть ефекту Доплера?

9. Результатом яких подій є те, що називають видимим світлом?

**§28. Про наші відчуття кольору та про те, чому навколишній світ                            різнобарвний.**

Навколишній світ дивовижно різнобарвний. Звідки ж береться все розмаїття кольорів? Чому одні предмети червоні, інші – зелені, треті – малинові, а четверті – білі? Як ми бачимо загалом і як відрізняємо одні кольори від інших? Ці та їм подібні запитання хвилювали людей завжди. Однак довгий час загадка світла та його кольорів залишалась тією науковою проблемою яка не мала задовільного вирішення. Перший, а тому найважливіший крок на шляху розв’язання цієї проблеми, зробив видатний англійський фізик Ісаак Ньютон (1643-1727).

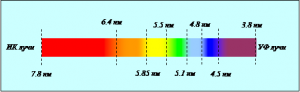
Напевно однією з основних рис геніальності вченого, є здатність помічати в загально відомих явищах їх глибинну суть. Скажімо про те, що існують веселки, що в потоці сонячного світла фактично прозорі мильні бульбашки та діамантові прикраси набувають райдужного забарвлення, знали всі. Однак лише Ньютон зрозумів, що ці та їм подібні факти, вказують на складну структуру білого світла. В 1666 році, прагнучи перевірити дане припущення, Ньютон пропускає вузький пучок сонячного (білого) світла через трикутну призму та з’ясовує, що в процесі проходження через призму, біле світло певним чином розкладається (мал.96а). Результатом цього розкладання є характерна кольорова смужка, яка складається з послідовно розташованих червоного, оранжевого, жовтого, зеленого, голубого, синього та фіолетового кольорів. Цю кольорову смужку Ньютон назвав **спектром сонячного світла**.

Мал.98. Біле світло, це суміш певних спектральних кольорів (І. Ньютон).

Прагнучи переконатись в тому, що отримані кольори дійсно є складовими частинами білого світла, Ньютон вирішує здійснити зворотнє перетворення, тобто перетворення спектральної суміші кольорів в біле світло. З цією метою, на шляху спектру сонячного світла, він ставить ще одну трикутну призму, просторова орієнтація якої є протилежною до тієї що розкладає світло. При цьому Ньютон, не без задоволення з’ясовує, що при змішуванні спектральних кольорів, знову утворюється біле світло (мал.98б).

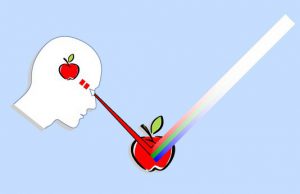
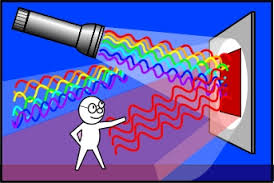
Таким чином, в 1666 році, Ньютон безумовно довів, що біле світло представляє собою певну сукупність червоного, оранжевого, жовтого, зеленого, голубого, синього та фіолетового кольорів. І сьогодні ми знаємо, що кожному з цих кольорів відповідає певний діапазон довжин хвиль. Потрібно зауважити, що поділ неперервного кольорового спектру сонячного світла на сім кольорів, є досить умовним. З не меншим успіхом цей спектр можна було б поділити на п’ять чи скажімо п’ятдесят кольорів. Однак, історично склалося так, що неперервний спектр видимого світла, поділили на сім основних кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий.



Мал.99. Кожному кольору спектру видимого світла відповідає певний діапазон довжин хвиль.

Зважаючи на факт того, що видиме світло, це певна суміш електромагнітних хвиль, які в залежності від їх довжини, викликають відчуття певного кольору, не важко пояснити, чому тіла бувають різними: білими, чорними, прозорими, не прозорими, зеленими, синіми та взагалі різнобарвними. Дійсно. Переважна більшість оточуючих нас тіл, є такими, що самі по собі не світяться. Ці тіла ми бачимо тільки тому, що вони в тій чи іншій мірі відбивають стороннє світло (непрозорі тіла), або пропускають його (прозорі тіла). При цьому, те що ми бачимо залежить від двох обставин. 1) Від спектрального складу того світла в потоці якого знаходяться навколишні тіла. 2) Від оптичних властивостей самих тіл, тобто від того, хвилі яких кольорів ці тіла відбивають (для непрозорих тіл) або пропускають (для прозорих тіл).

І не важко збагнути, що те тіло яке повністю пропускає всі хвилі видимого (білого) світла, є **безбарвно прозорим**. Те тіло яке повністю відбиває всі хвилі видимого (білого) світла є **білим**. Те  тіло яке повністю поглинає всі хвилі видимого світла є **чорним**. Якщо ж певну складову білого світла тіло відбиває (або пропускає), а певну – поглинає, то таке тіло є кольоровим. Скажімо, якщо тіло відбиває або пропускає червону складову білого світла, а решту складових поглинає, то таке тіло є червоним.

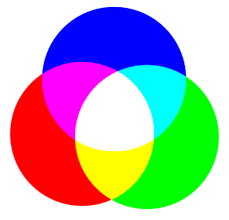
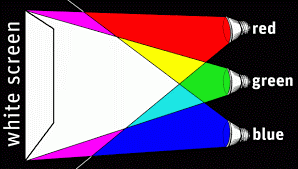
 

Мал.100. Предмет червоного кольору відбиває лише червону складову білого світла і тому ми бачимо цей предмет червоним.

Втім, видимий колір тіла залежить не лише від його власного кольору, а й від спектрального складу того світла в потоці якого це тіло знаходиться. Наприклад, якщо червоне тіло освітлювати світлом синього кольору, то воно буде чорним. І це закономірно. Адже червоне тіло є червоним тому, що відбиває (пропускає) хвилі червоного світла, а всі інші хвилі, в тому числі і сині, – поглинає. Тому, перебуваючи в потоці синіх хвиль, червоне тіло ці хвилі повністю поглинає, а отже виглядає як чорне.

Однак, потрібно мати на увазі, що більшість кольорових тіл відбивають (пропускають) хвилі не одного кольору, а певної сукупності сусідніх кольорів. Скажімо те тіло яке має жовтий колір, скоріш за все відбиває (а для прозорого тіла – пропускає) не лише хвилі жовтого кольору, а й хвилі сусідніх кольорів – зеленого та оранжевого. Більше того, це тіло взагалі може відбивати (пропускати) лише оранжеві та зелені кольори і виглядати при цьому бездоганно жовтим.

Вагомий внесок в справу пізнання суті того яким чином ми бачимо світ різнобарвним, зробив ще один англійський фізик Томас Юнг (1773-1829). В 1807 році, Юнг з’ясував, що все різноманіття кольорів можна отримати шляхом певних комбінацій трьох базових кольорів: червоного, зеленого та синього. В цьому не важко переконатись, якщо на білий екран направити однаково потужні світлові потоки червоного, зеленого та синього кольорів (мал.101). Провівши відповідний експеримент, ви неодмінно з’ясуєте, що в тому місці де всі три базові кольори накладаються, утворюється білий колір. Де накладаються червоний та синій кольори, утворюється малиновий. Де червоний та зелений – жовтий. А де синій та зелений – голубий. Якщо ж світлову інтенсивність базових кольорів змінювати, то можна отримати практично будь який кольоровий відтінок.

Мал.101. Все різноманіття світлових кольорів, можна отримати шляхом змішування червоного, синього та зеленого світла (Т. Юнг).

Потрібно зауважити, що ми говоримо не про змішування кольорових фарб, а про змішування відповідних світлових потоків, тобто електромагнітних хвиль різних довжин. Адже якщо ви змішаєте червону, зелену та синю фарби, то скоріш за все, отримаєте фарбу чорного кольору з “сіро-буро-малиновим” відтінком.

Тепер, коли ви знаєте, що біле світло, це певна суміш різних світлових кольорів і що все кольорове розмаїття можна отримати шляхом змішування червоного, зеленого та синього світла, не важко пояснити механізм нашої кольорово чутливості. А в загальних рисах цей механізм полягає в наступному.

Відомо, що сітківка ока складається з величезної кількості світлочетливих рецепторів, які прийнято називати паличками та колбочками. Відомо, що палички практично не розрізняють кольорів і що наше сприйняття кольору забезпечується тими рецепторами які називаються колбочками. При цьому дослідження показують, що в сітківці ока є три різновидності колбочок: червоночутливі, зеленочутливі та синьочутливі. Коли кольорове зображення предмету сфокусовано на сітківці ока, то відповідні кольорочутливі колбочки збуджуються. Це біоелектричне збудження, через клітини зорового нерву, передається до відповідних центрів кори головного мозку, де власне і формується відповідне зорове відчуття.

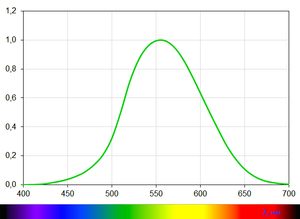
Доречно зауважити, що практично всі кольорочутливі рецептори ока (колбочки) зосереджені в районі так званої жовтої плями, тобто в тому центральному місці сітківки, куди проектується зображення того предмету на якому зосереджено наш погляд. По суті це означає, що кольоровим є лише центральний зір людини, тоді як зір переферійний є переважно чорно-білим. Крім цього, потрібно мати на увазі, що колбочки мають відносно низьку світлочутливість і тому спрацьовують лише в умовах достатньо високої освітленості. Власне тому, в сутінках наш зір стає чорно-білим.

Говорячи про наше сприйняття кольору, буде не зайвим сказати і про те, що кольорова картинка, сприйматиметься кольоровою лише в тому випадку, якщо зображення її окремих різнобарвних фрагментів потраплятимуть на різні світлочутливі рецептори сітківки ока (мал.102). Адже якщо наприклад, зображення від червоного, жовтого та синього фрагментів картинки, потраплятимуть на один і тойже світлочутливий рецептор, то він зафіксує усереднену дію відповідних кольорів, тобто світло білого кольору. Крім цього, потрібно мати на увазі, що певні кольори будуть створювати відповідні кольорові враження лише в тому випадку, якщо тривалість їх зорового сприйняття буде достатньо великою. Адже якщо наприклад, червона, зелена та синя картинки будуть змінювати одна одну достатньо швидко, то зір людини зафіксує усереднену дію відповідних кольорів, якою буде картинка білого кольору.

Мал.102. Якщо різні кольори потрапляють на різні рецептори сітківки ока, то зір людини фіксує ці кольори. А якщо ті ж кольори потрапляють на один і той же рецептор, то зір людини фіксує певний усереднений результат.

Дослідження показують, що чутливість людського зору до світла різних кольорів (різних довжин хвиль), є суттєво різною. Різною в тому сенісі, що оцінюючи яскравість однакових за енергетичною потужністю червоної, оранжевої, жовтої, зеленої, голубої, синьої та фіолетової лампочок, спостерігач з нормальним зором неодмінно скаже, що жовта та зелена лампочки є найяскравітоми, а червона та синьо-фіолетова – найтмянішими.

Зазвичай, чутливість зору до світла тих чи інших кольорів, кількісно оцінюють величиною, яка називається **коефіцієнтом спектральної чутливості ока** (позначається kλ). Ця безрозмірна величина дорівнює відношенню чутливості ока до випромінювання з даною довжиною хвилі, до його максимально можливої чутливості. А цією максимально можливою чутливістю, є чутливість до випромінювання з довжиною хвилі 555нм. Числове значення коефіцієнту спектральної чутливості ока, визначається експериментально та записується у відповідну таблицю, або представляється у вигляді відповідного графіку. Графік залежністі чутливості людського зору до світла різних кольорів називають **кривою спектральної чутливості світлоадаптованого ока**. Загальний вигляд цієї кривої представлено на мал.103.



Мал.103.  Загальний вигляд кривої спектральної чутливості світоадаптованого ока.

Застосовоючи дані кривої спектральної чутливості та табличні значення коефіцієнту спектральної чутливості, не варто забувати про те, що мова йде про певну усереднену характеристику людського зору. І що відповідні параметри зору конкретної людини, можуть суттєво відрізнятись від усередненої величини. Крім цього, потрібно мати на увазі, що спектральна чутливість ока залежить не лише від індивідуальних особливостей зору конкретної людини, а й від інтенсивності самого випромінювання.

Загалом же, варто памятати, що наші відчуття кольору, смаку, звуку, дотику, тощо, в значній мірі індивідуальні. І в цьому сенсі, надмірний педантизм тих медиків які вимірюють якість нашого сприйняття кольору, часто густо не витримує науково обгрунтованої критики.

Якщо ж говорити про дефекти наших кольоровідчуттів, то вони дійсно існують. Зазвичай, ці дефекти позначають терміном **дальтонізм.** І потрібно сказа, що дальтоніками часто та абсолютно не обгрунтовано називають всіх тих людей, індивідуальне сприйняття кольору яких, суттєво відрізняється від загально прийнятих норм. При цьому хибно вважається, що дальтоніки бачать навколишній світ чорно білим. Насправді ж в переважній більшості випадків, мова йде про людей, в яких порушена нормальна робота лише однієї (рідше двох) різновидностей рецепторів кольору. А це означає, що відповідні люди бачать навколишній світ не червоно-зелено-синім, а червоно-зеленим, або червоно-синім, або зелено-синім. До речі, дослідження показують, що майже всю палітру кольорів можна отримати за допомогою певної комбінації лише двох кольорів, зокрема червоного та синього. А це означає, що спектр тих кольорів які бачить людина з двокольоровим зором, якщо і відрізняється від загально прийнятих норм, то зовсім не настільки, щоб вважати ці відмінності суттєвими. А тим більше такими, які накладають певні обмеження на професю, скажімо на професію водія.

Зважаючи на вище сказане, доречно говорити не про дальтонізм, а про трикольоровий (нормальний), двокольоровий, однокольоровий та некольоровий зір. Це тим більш доречно, зважаючи на факт того, що дальтонізм це не хвороба, а дефект зору. Дефект малоприємний, але не більш малоприємний за далекозорість, короткозорість чи астегматизм. Проблема лише в тому, що на сьогоднішній день, той дефект зору який прийнято називати дальтонізмом, ми не вміємо виправляти.

**Контрольні запитання.**

1.Поясніть, чому тіла бувають червоними, зеленими, білими та чорними?

2. Який внесок в розвиток наших уявлень про кольри зробив Т. Юнг?

3. Якого кольру буде синя фарба в потоці червоного світла?

4. Відомо, що при змішуванні однакової кількості червоного та синього світла, утворюється біле світло. Чому ж при змішуванні аналогічних фарб, утворюється фарба чорного кольору?

5. Опишіть механізм наших кольоровідчуттів.

6. Поясніть, чому в сутінках, наш зір стає чорно-білим?

7. Відображенням яких фактів є крива спектральної чутливості ока?

8. Поясніть суть того дефекту зору, який прийнято називати дальтонізмом? Чи є цей дефект таким, при якому людина не розрізняє кольорів?

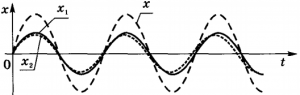
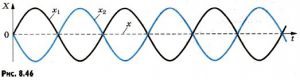
**§29. Інтерференція світла.**

Експериментальні факти вказують на те, що хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної. Незалежно в тому сенсі, що при взаємодії (накладанні) різних хвиль, індивідуальні властивості та параметри кожної з них зберігаються. Наприклад, кинувши на гладеньку поверхню води два камінці та спостерігаючи за поведінкою ними створених хвиль, ви неодмінно з’ясуєте, що пройшовши одна крізь одну, кожна з хвиль веде себе так, ніби іншої хвилі й не існувало. Або, скажімо, коли грає оркестр, то звуки від кожного його інструменту доходять до слухача такими, ніби грає тільки цей інструмент. Або, наприклад, коли кожна радіостанція, кожна телевізійна станція та кожний мобільний телефон, постійно посилають в навколишній простір свої радіохвилі, то ці хвилі розповсюджуються так, ніби працює лише ця радіостанція, лише цей телеканал, лише цей мобільний телефон.

Звичайно, вище сказане не означає, що та поверхня води на якій розповсюджується одна хвиля, знаходиться в тому ж стані що і поверхня води на якій розповсюджуються дві, чи скажімо сто хвиль. Просто ця поведінка буде визначатися результуючою силових впливів всіх окремо взятих хвиль. При цьому, оскільки хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної, то знаючи параметри кожної окремо взятої хвилі, можна визначити хвильову ситуацію в будь якій точці простору і в будь який момент часу. Наприклад, якщо в даній точці простору, в даний момент часу сходяться дві хвилі, одна з яких намагається підняти фрагмент поверхні на 2см, а друга – прагне опустити цей фрагмент на 2см, то результатом дії цих хвиль буде те, що відповідний фрагмент поверхні у відповідний момент часу буде знаходитись в нульовому положенні.

Закон, який констатує факт того, що хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної і що їх результуюча дія визначається як сума дій кожної окремої хвилі, називається принципом суперпозиції хвиль. **Принцип суперпозиції хвиль**, це закон в якому стверджується: ***хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної, тобто таким чином що при їх взаємодії, індивідуальні властивості та параметри кожної хвилі зберігаються. При цьому, результуюча дія системи багатьох хвиль, визначається як сума відповідних дій кожної окремої хвилі.***

Застосовуючи принцип суперпозиції можна пояснити багато хвильових явищ, зокрема те, яке прийнято називати інтерференцією хвиль (від лат. inter – взаємно, та ferio – вдаряти). З’ясовуючи суть цього явища, розглянемо декілька простих ситуацій. Припустимо, що в даному місці простору, сходяться і накладаються дві хвилі однакової довжини і однакової амплітуди коливань. Не важко збагнути, що амплітудні параметри результуючої хвилі, будуть залежати від того наскільки співпадатимуть фази коливань тих хвиль які накладаються. Дійсно, якщо ці фази повністю співпадають (різниця фаз дорівнює нулю Δφ=0), то згідно з принципом суперпозиції, результатом накладання хвиль буде хвиля з практично вдвічі більшою амплітудою коливань (мал.104а). Якщо ж фази коливань набігаючих одна на одну хвиль є взаємно протилежними (різниця фаз є еквівалентною половині періоду коливань, тобто Δφ=π), то результатом накладання хвиль, буде хвиля з практично нулевою амплітудою коливань (мал.104б). Якщо ж різниця фаз матиме певне проміжне значення (0<Δφ<π), то і амплітуда результуючої хвилі матиме відповідну проміжну величину.

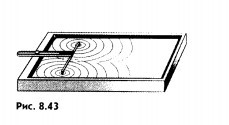
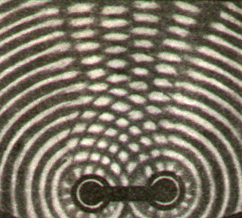
Мал.104. В процесі накладання, хвилі однакової періодичності можуть як підсилюватись так і послаблюватись.

Таким чином, в процесі накладання, хвилі однакової періодичності, можуть стійким чином як підсилюватись так і послаблюватись. При цьому, величина відповідного підсилення чи послаблення, визначальним чином залежить від тієї різниці фаз, що існує між коливаннями базових хвиль. Зауважимо, що говорити про стійке підсилення чи послаблення хвиль, можна лише в тому випадку, якщо параметри періодичності відповідних хвиль (Т, ν, λ) є однаковими, або майже однаковими. Адже якщо накладатимуться хвилі суттєво різних довжин, то результатом такого накладання буде хвиля, амплітудні параметри якої в будь якій точці будуть постійно змінюватись.

Дослідження показують, що на практиці, прогнозовано стійке підсилення хвиль в одних місцях та їх послаблення в інших, спостерігається  лише в тому випадку коли накладаються так звані **когерентні хвилі**(від лат. cohaerens – взаємопов’язані, узгоджені). **Когерентними**(узгодженими), називають такі хвилі, які мають однакові параметри періодичності (Т, ν, λ), однакову площину коливань та незмінну різницю фаз. Наприклад, якщо на поверхню води безладним чином падають камінці, то створювані ними хвилі не є когерентними. Адже параметри цих хвиль, зокрема фази їх коливань, не є такими що узгоджені між собою. Якщо ж ці камінці є елементами єдиного механізму, який періодично та одночасно занурює їх у воду, то створювані ними хвилі будуть когерентними.

Характерною особливістю когерентних хвиль є те, що при їх накладанні, можна спостерігати стійку хвильову картинку, в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших. Цю картинку називають інтерференційною. А явище, проявом якого є інтерференційна картинка називають інтерференцією хвиль. **Інтерференція хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що при накладанні когерентних хвиль, спостерігається стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших місцях.

Наочні уявлення про інтерференцію поверхневих хвиль, можна отримати за допомогою приладу, схема якого представлена на мал.105. В цьому приладі, періодичні коливання двох жорстко з’єднаних кульок створюють когерентні хвилі, які в процесі інтерференції створюють певну інтерференційну картинку.

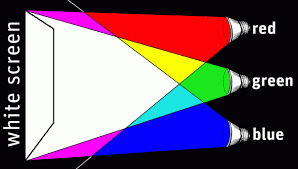
   

Мал.105. Прилад для демонстрації інтерференції поверхневих хвиль, та загальний вигляд відповідної інтерференційної картинки.

Інтерференція відноситься до числа тих базових явищ, які безумовно вказують на хвильову природу того об’єкту, який створює відповідну інтерференційну картинку. Тому, коли ми стверджуємо що світло це потік електромагнітних хвиль, то це автоматично означає, що за певних умов ці хвилі мають створювати відповідну інтерференційну картинку. А оскільки видиме світло, це суміш різних хвиль, кожній з довжин яких відповідає певний колір зорових відчуттів, то логічно передбачити, що світлова інтерференційна картинка має бути кольоровою. Кольоровою тому, що в різних точках простору мають підсилюватись хвилі різних довжин, а отже і різних кольорів.

Ви можете запитати, якщо при накладанні світлових хвиль має утворюватись певна кольорова картинка, то чому ж оточуючі нас тіла не переливаються всіма барвами веселки. Адже ці тіла зазвичай знаходяться в потоках різних світлових хвиль, які накладаються одна на одну, і які в одних місцях мали б підсилювстись, а в інших – послаблюватись. Причина такого стану речей полягає в тому, що для утворення стійкої інтерференційної картинки потрібні не просто хвилі, а хвилі когерентні, тобто певним чином узгоджені між собою. І ця узгодженість має бути достатньо тривалою. У всякому разі достатньою для того, щоб система зору людини змогла зафіксувати відповідну картинку.

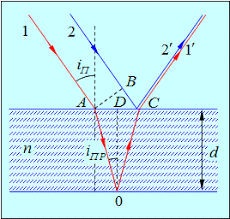
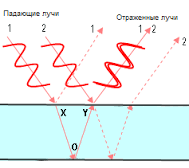
Дослідження ж показують, що звичайні джерела світла (Сонце, зірки, свічки, лампочки розжарювання, лампочки денного світла, тощо), практично ніколи не створюють когерентних хвиль. Не створюють тому, що в цих джерелах, світло є результатом або інтенсивного теплового, а отже хаотичного, руху заряджених частинок речовини, або ж тих абсолютно не узгоджених процесів, які відбуваються в енергетично збуджених атомах речомини. А це означає, що кожне з звичайних джерел світла, створює свою систему хвиль, і ці системи хвиль жодним чином не узгоджені між собою. Такі хвилі якщо й інтерферують то лише таким чином, що створювані ними кольорові картинки змінюються так швидко (мільйони разів за секунду), що система зору людини не встигає зафіксувати будь яку з них. Власне те, що ми сприймаємо як біле (безбарвне) світло, це результат інтерференції (накладання) не узгоджених (не когерентних) хвиль різних довжин.



Мал.106. Біле світло, це результат інтерференції (накладання) не крогерентних електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 380нм до 760нм.

Найпростіший спосіб створення стійкої інтерференційної картинки полягає в тому, щоб змусити інтерферувати (накладатись) ті хвилі які створюються одним і тим же джерелом. Адже такі хвилі є безумовно когерентними. Проблема лише в тому, що хвилі від будь якого джерела світла поступово розходяться і тому не накладаються одна на одну, а отже і не інтерферують між собою. Втім, за певних умов таке інтерферування стає можливим. Прикладом таких умов є тонкі напівпрозорі плівки, наприклад такі, як мильні бульбашки.

Напевно всі ви бачили, як в потоці сонячного чи іншого подібного світла, мильні бульбашки переливаються всіма барвами веселки? Пояснюючи походження цього кольорового забарвлення, розглянемо наступну ситуацію. Припустимо, що на поверхню тонкої, напівпрозорої плівки падає потік паралельних променів видимого світла, складовими якого є промені 1; 2, і якому відповідає хвильовий фронт АВ (мал.107а). У відповідності з законами геометричної оптика, промінь 1 в точці А частково відбивається (промінь1‘), а частково заломлюється, тобто проникає в нове середовище. При цьому, заломлена частина променя, відбиваючись від внутрішньої поверхні плівка та повторно заломлюючись в точці С, повертається до попереднього середовища (промінь 1“). Таким чином, відбиваючись від зовнішньої та внутрішньої поверхонь тонкої плівки, заданий хвильовий промінь 1, розкладається на дві когерентні складові 1’ та 1”. Ясно, що в точці С, сусідній промінь 2, аналогічним чином також розкладеться на дві когерентні складові 2’ та 2“. При цьому точка С стає джерелом двох когерентних хвильових променів (1” та 2’), які накладаються та інтерферують між собою. А оскільки видиме світло, це потік хвиль різної довжини, то в залежності від товщини плівки, в точці С одні хвилі будуть підсилюватись (мал.107б), а інші – послаблюватись (мал.107в). По суті це означає, що точка С матиме певне світлове забарвлення.

Мал.107.  Відбиваючись від зовнішньої та внутрішньої поверхонь тонкої плівки, кожен світловий промінь розкладається на дві когерентні складові, які інтерферуючи між собою створюють відповідну кольрову картинку.

З’ясовуючи ті кількісні співвідношення які визначають параметри тих хвиль що інтерференційно підсилюються в точці С, можна сказати наступне. Факт того, що біле світло представляє собою потік електромагнітних хвиль різних довжин, по суті означає, що точка С є джерелом когерентних хвиль всіх цих довжин. При цьому, в точці С підсиляться лише ті хвилі, для яких виконується умова підсилення. А ця умова полягає в тому, що різниця фаз між відповідними когерентними хвилями має бути нульовою (Δφ=0). По суті це означає, що на тому відрізку який називається оптичною різницею ходу променів (δ=|АО+ОС|-|ВС|) має розміститись ціле число довжин хвиль. Іншими словами, умову підсилення хвиль в точці С можна записати у вигляді δ=kλ, де k – ціле число.

Визначаючи різницю ходу між інтерферуючими хвилями, потрібно враховувати декілька обставин. По перше, факт того, що довжина хвилі (λ) в будь якому відмінному від вакууму середовищі, в n раз менша за її довжину в вакуумі (λ0): λ=λ0/n, де n – абсолютний показник заломлення світла даного середовища. По друге, факт того, що відбивання хвиль від оптично більш густого середовища відбуваються з втратою напівхвилі, що еквівалентно додатковому оптичному шляху довжиною λ/2. Зважаючи на ці обставини, можна стверджувати, що для зображеної на мал.90а ситуації, оптична різниця ходу променів 1” та 2’ становить δ=(АО+ОС)n − ВС+λ/2. При цьому можна довести, що дане співвідношення можна представити у більш загальному вигляді: δ=2d(n2-sin2α)1/2+λ/2, де d – товщина плівка; n – показник її заломлення;  α – кут падіння променів; λ – довжина заданої хвилі.

Таким чином, в залежності від товщини плівки (d), показника її заломлення (n) та кута падіння променів (α), в точці С підсилюються ті хвилі, довжина яких відповідає співвідношенню kλ=2d(n2-sin2α)1/2+λ/2, або kλ-λ/2=2d(n2-sin2α)1/2, або λ=2d(n2-sin2α)/(k-1/2).

Ясно, що вище описані події будуть відбуватись в кожній точці повершневого шару плівки. При цьому, зважаючи на факт того, що в загальному випадку товщина різних фрагментів плівки та кут падіння променів на них, можуть бути суттєво різними, відповідно різними будуть і світлові забарвлення цих фрагментів. Можна довести, що в тому випадку, якщо поверхня плівки плоска, а її товщина плавно змінна, створювана плівкою інтерференційна картинка, представлятиме собою певний набір спектральних смужок (мал.108а). Якщо ж поверхня плівки сильно викривлена, а її товщина довільно змінна (як наприклад в мильній бульбашці), то відповідна інтерференційна картинка буде розмитою та довільно змінною (мал106б).

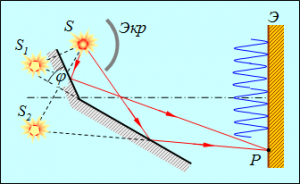
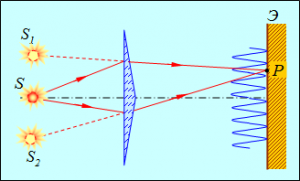
   

Мал.108.  Інтерференційна картинка яку створює а) плоска плівка змінної товщини; б) куляста плівка.

Дослідження показують, що по мірі збільшення товщини плівки, яскравість створюваних нею інтерференційних смужок, поступово згасає, а їх ширина – зменшується. При цьому, за певної товщини плівки, ці смужки стають такими тмяними, вузькими та близько розташованими, що зір людини перестає їх розрізняти. А це означає, що неозброєним оком інтерференцію світла на напівпрозорих плівках, можна спостерігати лише в певному діапазоні товщин цих плівок. Скажімо для білого світла, ці товщина не мають суттєво перевищувати 0,01мм. Якщо ж плівку освітлювати **монохроматичним** (однокольоровим) світлом, то інтерференційну картинку можна спостергати і при значно більших товщинах (до 0,5мм).

Інтерференційні картинки створюють не лише за допомогою тонких напівпрозорих плівок, а й з застосуванням спеціальних оптичних приладів. Найпоширенішими серед них є спеціальні дзеркала, біпризми (а по суті надтонкі збиральні лінзи) та дифракційні решітки (мал.109). Принцип дії дзеркал та біпризм очевидно простий. Частини того світлового потоку, який створюється точковим джерелом світла S, в процесі відбивання (для дзеркал) або заломлення (для біпризм) змінюють напрям свого розповсюдження таким чином, що накладаючись одна на обну інтершерують між собою. А оскільки ці частини є складовими одного і того ж світла, то вони є безумовно когерентними, а отже такими, що утворюють кольорову інтерференційну картинку.

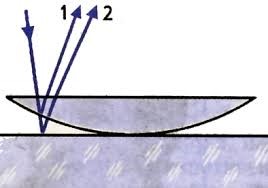
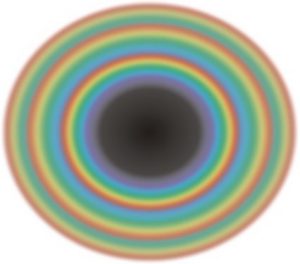
Якщо ж говорити про той прилад який називається дифракційною решіткою, то про це ми поговоримо в одному з наступних параграфів.

Мал.109. Інтерференційні картинки штучно створюють за допомогою спеціальних біпризм, дзеркал та дифракційних решіток.

Потрібно зауважити, що для здійснення вище описаних експериментів потрібні не просто дзеркала і не просто біпризми, а спеціальні дзеркала і спеціальні біпризми. Ця спеціальність полягає в тому, що у відповідних дзеркалах та біпризмах, кутове відхилення робочих поверхонь має бути надзвичайно малим (φ < 1°).

Перші наукові дослідження інтерференції світла були здійснені в 1675 році. В цьому році, Ньютон звернув увагу на те, що в місці контакту опуклої, плоско сферичної, довгофокусної лінзи, з плоскою склянною поверхнею, виникає система кольорових кілець (мал.110). Як відомо, Ньютон не безпідставно був прихильником корпускулярної теорії світла і тому не зміг правильно пояснити дане явище. Це зробив в 1801році Томас Юнг. Суть його поясненнь полягає в наступному. Світлові хвилі відбиваючись від внутрішньої сферичної поверхні лінзи та плоскої поверхні скла, розкладаються на когерентні складові, які інтерферують між собою. Результатом цієї інтерференції є певний набір кольорових кілець (кілець Ньютона), параметри яких певним чином відображають відстань між двома склянними поверхнями в тому місці де формуються відповідне кільце.

Мал.110. Відбиваючись від різних поверхонь, світлові хвилі розкладаються на когерентні складові, які в процесі інтерференції утворюють систему різнобарвних кілець (кілець Ньютона).

На завершення додамо. Коли ми стверджуємо, що звичайні джерела світла практично ніколи не створюють когерентних хвиль, то фактично натякали на те, що мають існувати певні незвичайні джерела світла, які здатні створювати когерентні хвилі. І такі джерела дійсно існують. Їх називають **оптичними квантовими генераторами** або **лазерами**. Втім, про будову та принцип дії цих незвичайних джерел світла, ми поговоримо дещо пізніше.

**Словник фізичних термінів.**

**Принцип суперпозиції хвиль**, це закон в якому стверджується: хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної, тобто таким чином що при їх взаємодії, індивідуальні властивості та параметри кожної хвилі зберігаються. При цьому, результуюча дія системи багатьох хвиль, визначається як сума відповідних дій кожної окремої хвилі.

**Інтерференція хвиль** – це явище, суть якого полягає в тому, що при накладанні когерентних хвиль, спостерігається стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших місцях.

**Когерентними** (узгодженими) називають такі хвилі, які мають однакові параметри періодичності (Т, ν, λ), однакову площину коливань та незмінну різницю фаз.

**Монохроматичним** (від грец. monos – один та chroma – колір) називають таке світло, яке складається з електромагнітних хвиль певної, строго визначеної довжини хвилі (певного кольору).

**Контрольні запитання**

1.За якої умови хвилі однакової періодичності підсилюються?

2. Наведіть приклад механічної моделі джерела когерентних та некогерентних хвиль.

3. Чому ті світлові потоки які створюються двома абсолютно однаковими лампочками розжарювання при накладанні не створюють інтерференційну картинку?

4.Яким чином створюють потоки інтерферуючих когерентних хвиль?

5.Від чого залежить колір інтерференційного забарвлення певного фрагменту тонкої напівпрозорої плівки?

6.Чому біле світло створює кольорову інтерференційну картинку?

7. Чому Ньютон не зміг правильно пояснити причину появи відкритих ним інтерференційних кілець?

**Вправа 14.**

1.В дану точку простору приходять когерентні хвилі з різницею ходу 2,0мкм. Підсиляться чи послабляться ці хвилі, якщо їх довжина 760нм; 600нм; 400нм?

2. В певну точку простору приходять когерентні хвилі, довжина яких в вакуумі 600нм, а різниця ходу 1,2мкм. Що відбуватиметься в даній точці при розповсюджені хвиль в повітрі; в воді; в склі?

3. В даній точці, дві когерентні хвилі взаємно гасяться. Що відбувається з енергією цих хвиль?

4. Відстань на екрані (мал. задача 4) між двома інтерференційними максимумами становить 1,2мм. Визначити довжину хвилі того світла яке випромінюють когерентні джерела S1 i S2, якщо S1S2=1мм; СО=4м.

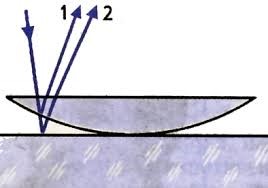
5. Як змінюватиметься інтерференційна картинка на екрані (мал. задача 4) якщо: а) не змінюючи відстань між джерелами світла, віддаляти їх від екрану; б) не змінюючи відстань до екрану, наближати джерела світла; в) джерела випромінюватимуть світло з меншою довжиною хвилі?

**§30. Застосування інтерференції. Інтерферометри. Просвітлення оптики.**

Інтерференція світла не лише забезпечує веселкове забарвлення мильних бульбашок та масляно-бензинових плям, а й корисно застосовується в приладах які називаються інтерферометрами. **Інтерферометр** це прилад, який з надзвичайно високою точністю вимірює довжину і принцип дії якого базується на кількісному аналізі тієї інтерференційної картинки яка певним чином пов’язана з предметом вимірювань.

По суті, першим штучно створеним інтерферометром була та оптична система яка створювала інтерференційну картинку під назвою кільця Ньютона. Це означає, що на основі кількісного аналізу цієї інтерференційної картинки та певних вимірювань, можна визначити низку тих величин, які так чи інакше причетні до створення цієї картинки. Зокрема визначити довжини тих електромагнітних хвиль які називаються видимим світлом; визначати відстань між тими поверхнями які приймають участь в створенні відповідної інтерференційної картинки; визначати параметри наявних на поверхнях мікродефектів, тощо.

Дійсно. Припустимо, що плоско-опукла лінза достатньо великого радіусу кривизни, в точці О контактує з плоскою, оптично рівною поверхнею (мал.111). Припустимо, що на цю оптичну систему падає вертикальний потік монахроматичного світла. Це світло частково відбивається від внутрішньої поверхні лінзи, а частково – від тієї поверхні на яку ця лінза спирається. А це означає, що в даній системі базовий промінь розкадається на дві когерентні складові 1 і 2, які інтерферуючи між собою можуть як підсилюватись так і послаблюватись. При цьому, умова інтерференційного підсилення хвиль полягає в тому, що на тій відстані яка називається різницею оптичного ходу променя (δ) має поміститись ціле число довжин хвиль. Іншими словами, підсилення хвиль довжини λ, відбуватиметься в тих точках для яких виконується умова δ=kλ, де δ – різниця оптичного ходу інтерферуючих хвиль, k – ціле число, величина якого дорівнює порядковому номеру інтерференційного кільця.

Мал.111. Інтерференційний метод визначення довжини, по суті зводиться до підрахунку кількості тих інтерференційних максимумів (кілець, смужок, ліній, тощо), які утворюються на відповідному відрізку.

З іншого боку, зважаючи на те, що кут падіння променя близький до нуля (α≈0º), можна стверджувати, що різниця оптичного ходу променів становить δ=2d+λ/2, де d – виміряна в точці підсилення хвиль відстань між заокругленою поверхнею лінзи та тією площиною на яку ця лінза спирається; доданок λ/2 вказує на те, що на межі повітря – плоска поверхня, відбивання світлових хвиль відбувається з втратою напівхвилі.

Таким чином, з одного боку δ=kλ, а з іншого δ=2d+λ/2. Звідси випливає, що 2d+λ/2=kλ, або d=λ(k-1/2)/2. А це означає, що знаючи довжину хвилі (λ) того світла яке підсилюється в тій чи іншій точці інтерференційної картинки, та визначивши порядковий номер (k) відповідного інтерференційного кільця, можна визначити відстань між даними поверхнями в будь якій точці: d=λ(k-1/2)/2. При цьому визначити з надзвичайно великою точністю. Скажімо, якщо дану інтерференційну картинку створює монохроматичне світло з довжиною хвилі λ=600нм, то це оначає, що по периметру першого інтерференційного кільця, величина зазору становить d1=150нм; по периметру другого кільця  d2=450нм, третього –  d3=750нм і т.д.

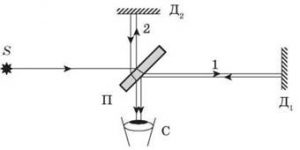
Сучасні інтерферометри характеризуються надзвичайним різноманіттям науково-технічних рішень. Однак, в незалежності від конструктивних особливостей того чи іншого інтерферометра, суть інтерференційного методу визначення довжини зводиться до підрахунку кількості тих інтерференційних максимумів (кілець, смужок, ліній, тощо), які утворюються на відповідному відрізку. Це певним чином нагадує технологію визначення віку дерев: порахувавши кількість річних кілець на поперечному зрізі відповідного дерева, ми точно визначаємо його вік.

Надважливою особливістю інтерференційних методів вимірювання довжини є надзвичайно велика точність вимірювань. Адже ці методи дозволяють вимірювати довжини об”єктів з точністю вимірювання довжини світлової хвилі. А на сьогоднішній день ця точність становить соті частини нанометра. По суті це означає, що сучасні оптичні інтерферометри дозволяють вимірювати довжину з точністю 0,01нм=0,000.000.01мм, а це в сотні тисяч разів перевищує точність найточніших механічних засобів вимірювань. Для порівняння: точність лінійки 1мм, точність штангенциркуля 0,1мм, а точність механічного мікрометра 0,01мм. І відтепер ви розумієте, чому довжину еталонного метра визначать таким, на перший погляд дивним чином: метр, це довжина рівна 1650763,73 довжин хвиль того випромінювання яке відповідає переходу між рівнями 2р10 та 5d5 атома крептону 86.

Загалом, інтерференційні картинки є носіями величезної кількості інформації про ті об’єкти, які так чи інакше причетні до їх створення. На основі аналізу цих картинок можна не лише визначати довжини електромагнітних хвиль та ті чи інші відстані, а й геометричні параметри поверхонь, їх сируктуру, наявність мікродефектів, та навіть їх хімічний склад. Аналізуючи інтерференційні картинки визначають параметри руху різноманітних об’єктів, показники заломлення світла, кутові розміри зірок, тощо. Ситуація певною мірою аналогічна тому, як за аналізом структури річних кілець дерева, визначають не лише його вік, а й загальні кліматичні параметри кожного року його життя, тенденції кліматичних змін, наявність чи відсутність певних конкретних подій як то лісових пожеж, вивержень вулканів, тощо.

В залежності від тих завдань які вирішує той чи інший прилад, та від способу отримання когерентних хвиль, існує велике різноманіття сучасних інтерферометрів. Однак, в історії науки особливе місце належить інтерферометру, який в 80-х роках дев’ятнадцятого століття створив американський фізик Альберт Майкельсон (1852-1931). Про ту важливу роль яку зіграв інтерферометр Майкельсона в історії науки, ми поговоримо дещо пізніше. Наразі ж, розгянемо будову та принцип дії цього важливого приладу.

Основними елементами інтерферометра Майкельсона (мал.112) є джерело монохроматичного світла (S), напівпрозора склянна пластина (П),  система двох взаємно перпендикулярних дзеркал (Д1; Д2) та екран (спостерігач С).



Мал.112.  Схема принципового устрою інтерферометра Майкельсона.

Принцип дії інтерферометра Майкельсона полягає в наступному. Від джерела монохроматичного випромінювання S, направлений світловий потік потрапляє на разташовану під кутом 45° напівпрозору склянну пластину П, яка ділить цей потік на дві когерентні складові 1 і 2. Відбиваючись від дзеркал Д1 та Д2, ці складові знову потрапляють на напівпрозору пластинку, а від неї на екран інтерферометра або в око спостерігача (С). Будучи когерентними, хвилі потоків 1 і 2 інтерферують між собою, створюючи на екрані певний набір інтерференційних ліній.

При поздовдньому переміщенні рухомого дзеркала (скажімо Д1) на відстань яка дорівнює половині довжини світлової хвилі (Δl=λ/2), оптична довжина ходу інтерферуючих хвиль зміниться на цілу довжину хвилі (пройдений хвилею шлях зміниться на 2Δl=λ). А це означає, що при переміщені дзеркала Д1 на відстань Δl=λ/2, створена на екрані інтерференційна картинка, зміститься на один крок, тобто від даної інтерференційної лінії до наспупної аналогічної лінії.

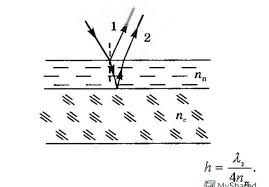
Таким чином, плавно переміщуючи дзеркало Д1 та рахуючи кількість тих інтерференційних ліній які при цьому проходять повз нерухому контрольну нитку екрану приладу, можна точно визначити величину переміщення дзеркала, а відповідно і довжину того об’єкту який з цим переміщенням пов’язаний. Наприклад, можна встановити, що довжина еталонного метра дорівнює 1650763,73 довжин тих хвиль які випромінюються енергетично збудженими атомами крептона 86 при їх переході з енергетичного рівя 2р10 на енергетичний рівень 5d5.

Потрібно зауважити, що напівпрозора пластинка (П) представляє собою прозору склянну пластинку покриту тонким шаром срібла, яке власне і розділяє світловий потік на дві частини. В такій ситуауії, те світло яке йде по шляху S→П→Д1→П→С проходить через шар скла тричі. А те світло яке іде по шляху S→П→Д2→П→С проходить через шар скла лише один раз. Зважаючи на ці обставини, на шляху того світла яке відбивається від дзеркала Д2, ставлять додаткову скляну пластину (П), товщина якої дорівнює товщині напівпрозорої пластини.

Ще одним важливим застосуванням інтерференції є так зване просвітлення оптики. Справа в тому, що навіть при нульовому куті падіння променів, скло та інші оптично прозорі матеріали відбивають від 4% до 9% світлової енергії. А оскільки сучасні оптичні системи складаються з десятків оптично прозорих деталей, то загальні втрати світлової енергії в них можуть досягати 90%. Крім цього, в результаті багаторазового відбивання світла, оптичні системи можуть наповнюватись великою кількістю розсіяного світла, що значно погіршує якість тих зображень які формують ці системи. Ясно, що в такій ситуації проблема суттєвого зменшення кількості того світла яке відбивається оптично прозорими тілами, є надзвичайно важливою. Ця проблема вирішується шляхом просвітлення оптики.

Суть того методу зменшення коефіцієнту відбивання світла який називають **просвітленням оптики** полягає в наступному. На поверхню оптично прозорого тіла, наприклад склянної лінзи, наносять тонкий шар певної, оптично прозорої речовини, показник заломлення світла якої значно менший за показник заломлення скла. За певних умов, наявність такої просвітлюючої плівки, дозволяє зменшити загальний коефіцієнт відбивання світла в десятки разів.

Не заглиблюючись в деталі тих інтерференційних процесів, що відбуваються в системі повітря-плівка-скло, констатуємо лише факт того, що за певної товщини плівки (d) та за певної величини її показника заломлення світла (nпл), коефіцієнт відбивання світла системи плівка-скло зменшується в десятки разів. А ця товщина і цей показник заломлення, визначаються із співвідношень: d=λ/4nпл ; nпл=(nсn0)1/2, де λ – довжина тих хвиль що відбиваються; nс – показник заломлення скла; n0 – показник заломлення повітря.

Мал.113. Для зменшення коефіціїнту відбивання світла, на відповідну поверхню наносять так звану просвітлювальну плівку.

Формула  d=λ/4nпл, фактично вказує на те, що для кожної довжини хвилі, має бути своя товщина просвітлюючої плівки. Тому цю товщину вибирають таким чином, щоб вона забезпечувала максимальне зменшення коефіцієнту відбивання світла для хвиль середніх довжин. При цьому для хвиль крайніх частин спектру коефіцієнт відбивання світла, якщо і зменшується, то не надто сильно. Зважаючи на ці обставини, оптично просвітлені поверхні мають червоний або бузковий відтінок.

**Словник фізичних термінів**

**Інтерферометр** це прилад, який з надзвичайно високою точністю вимірює довжину і принцип дії якого базується на кількісному аналізі тієї інтерференційної картинки яка певним чином пов’язана з предметом вимірювань.

**Контрольні запитання**

1.Чому в зображеній на мал.94 ситуації оптична різниця ходу променів відбитих від внутрішньої поверхні лінзи та повенхні пластини становить не 2d, a 2d+λ/2?

2. Чим метод вихначення відстаней за допомогою інтерферометра, схожий на метод визначення віку дерев?

3. Чому медод інтерференційного визначення довжини є такам точним?

4. Поясніть загальний устрій та принцип дії інтерферометра Майкельсона.

5. Чи впливає факт того, що промені 1 і 2 (мал.95) відбиваються від дзеркальних та напівдзеркальних поверхонь, на величину оптичного ходу цих поверхонь?

6. Відомо, що довжина еталонного метра становить 1650763,73 певних довжин хвиль. Скільки інтерференційних ліній пройшло повз контрольну нитку екрану інтерферометра Майкельсона, при вимірюванні довжини еталонного метра?

**Вправа 15.**

1.Плоско-опукла лінза, радіус кривизни якої 10м, знаходиться на склянній пластині та освітлюється нормально падаючим монохроматичним світлом з довжиною хвилі 600нм. Визначити радіуси чотирьох перших інтерференційних кілець та величини їм відповідних повітряних зазорів.

2. Попередню задачу розв’язати для випадку, коли простір між лінзою та склянною пластиною заповнено водою.

3. Радіус третього інтерференційного кільця Ньютона при освітлені монохроматичним світлом з довжиною хвилі 700нм становить 3мм. Визначити радіус кривизни плоско-сферичної лінзи.

4. Визначити оптимальну товщину та оптимальний показник заломлення просвітлюючої речовини для склянної лінзи з показником заломлення світла 1,7.

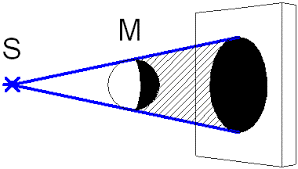
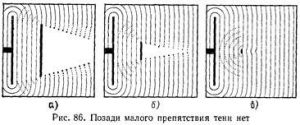
5. Скільки довжин хвиль монохроматичного світла з частотою коливань 5·1014Гц поміститься на відрізку 2,4мм в: а) вакуумі; б) воді; в)алмазі?

6. Повітряний клин утворено двома склянними пластинами, які знаходяться в потоці нормально направленого монохроматичного світла з довжиною хвилі 500нм. Визначити кут між пластинами, якщо відстань між двома сусідніми інтерференійними максимумами 0,5мм.

**§31. Дифракція світла. Дифракційна решітка.**

Уявіть собі безперервний потік дрібних частинок, які з однаковими швидкостями рухаються в одному напрямку. Якщо на шляху цього направленого потоку частинок зустрічається перешкода то за нею утворюється безкінечно довга геометрична тінь (мал.114а). І це закономірно. Адже ті частинки потоку які затримуються перешкодою не потрапляють у відповідну частину заперешкодного простору і тому цей простір залишається вільним від частинок.

Набігаючі на перешкоду хвилі, також затримуються цією перешкодою і тому логічно передбачити, що і в потоці хвиль за перешкодою має знаходитись безкінечно довга геометрична тінь. Однак, дослідження показують, що в потоці хвиль перешкода якщо і залишає певну тінь, то досить обмежену і таку параметри якої залежать як від розмірів перешкоди так і від довжини тих хвиль в потоці яких вона знаходиться (мал.114б). Іншими словами, експериментальні факти говорять про те, що в процесі розповсюдження, хвилі заходять в область геометричної тіні перешкоди. І що довжина реальної тіні цієї перешкоди (l) залежить як від лінійних розмірів самої перешкоди (d) так і від довжини тих хвиль (λ) в потоці яких вона знаходиться.

Мал.114. В направленому потоці частинок (а) за перешкодою утворюється безкінечно довга геометрична тінь. А в направленому потоці хвиль (б) ця тінь має обмежені розміри.

Характеризуючи здатність хвиль заходити в область геометричної тіні перешкоди, а простіше кажучи – їх здатність огинати перешкоди, говорять про дифракцію хвиль (від лат. diffractus – розламаний, переламаний). **Дифракція**, це явище, суть якого полягає в тому, що в процесі свого розповсюдження хвилі заходять в область геометричної тіні тієї перешкоди що зустрічається на їх шляху (огинають перешкоди).

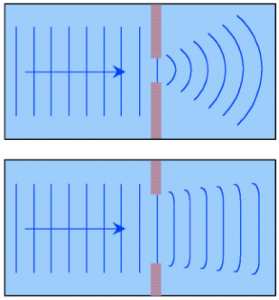
Коли, сховавшись за стовбуром дерева чи пагорбом, ви чуєте голос свого товариша, то скоріш за все, це результат того, що звукові хвилі огинають відповідні перешкоди. Ви можете запитати: “А чому ці перешкоди не огинають світлові хвилі?” відповідаючи на це слушне запитання можна сказати наступне. Світлові хвилі є надзвичайно короткими (λ~5·10-7м) і тому для них дерева, пагорби і навіть дрібні гілочки, є надзвичайно великими перешкодами. Втім, навіть такі дрібні хвилі як світлові, огинають перешкоди, в тому числі і такі великі як стовбури дерев. Просто для того щоб помітити цей факт потрібно відійти від дерева кілометрів на п’ять.

Те що хвилі в процесі свого розповсюдження поступово заходять в область геометричної тіні перешкоди, є абсолютно закономірною властивістю хвиль. Адже частинки середовища (параметри електромагнітного поля) певним чином пов’язані між собою. І тому наприклад, ті молекули води, які будучи частиною хвильового збурення здійснюють певні періодичні коливання, неминуче тягнуть за собою всі сусідні молекули, в тому числі і ті які знаходяться за умовною лінією геометричної тіні перешкоди. А це  означає, що в процесі розповсюдження хвилі, хвильове збурення неминуче заходитиме в область геометричної тіні перешкоди.

Дослідження показують, що довжина тієї тіні (l) яку залишає перешкода в потоці хвиль залежить як від довжини цих хвиль (λ) так і від лінійних розмірів перешкоди (d). В дещо спрощеному варіанті, цю залежність можна записати у вигляді l≅d2/λ. Скажімо, якщо мова йде про світлові хвилі (λ∼5·10-7м), то довжина тієї тіні яку залишає в потоці таких хвиль предмет діаметром 1см (наприклад олівець) становить λ≅(1·10-2м)2/5·10-7м=200м. По суті це означає, що даний предмет на відстані понад 200м стає практично невидимим. Звичайно за умови, що цей предмет сам по собі не є джерелом світла. Якщо ж мова йде про предмет діаметром 0,01мм (для порівняння, середній діаметр людського волосся 0,1мм), то він буде невидимим навіть на відстані найкращого зору людського ока (≈25см).

Втім, дифракція хвиль, це надзвичайно складне та багатогранне явище. Тому, пояснюючи яким чином хвилі огинають перешкоди та прогнозуючи поведінку цих хвиль, потрібно враховувати не лише взаємодію хвиль з незбуреною частиною середовища і не лише їх взаємодію з самою перешкодою, а й певні особливості самого хвильового процесу. А ці особливості такі, що їх надзвичайно важко представити у вигляді наочно простих аналогій.

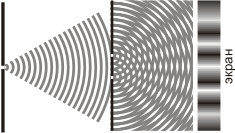
Напевно, найбільш ефектним проявом дифракції є ситуація в якій на шляху хвильового потоку зустрічається непереборно велика перешкода що має відносно вузьку щілину (d~λ). В такій ситуації (мал.115), результатом складного дифракційного процесу є те, що щілина стає джерелом слабких  кільцевих (сферичних) хвиль, тобто веде себе як точкове джерело хвиль.



Мал.115. Якщо розміри щілини співрозмірні з довжиною хвилі, то ця щілина фактично стає точковим джерелом хвиль.

Пояснюючи таку на перший погляд дивну поведінку хвиль, можна сказати наступне. Коли хвилі зустрічаються з поодинокими перешкодами, то основною причиною того, що вони заходять в область їх геометричної тіні є взаємодія збуреної та незбуреної частин середовища. Результатом такої взаємодії є відносно поступове заходження хвиль в область геометричної тіні перешкоди, інтенсивність якого залежить від довжини відповідної хвилі. Якщо ж на шляху хвилі зустрічається вузька щілина, тобто дві близько розташовані перешкоди, то в цьому випадку, визначально важливу роль починають відігравати ті взаємодії що відбуваються між хвилею і краями перешкоди, та ті складні хвильові процеси що супроводжують ці взаємодії. Результатом цих процесів та взаємодій є факт того, що прямолінійний фрагмент хвильового фронту деформується і стає кільцевим. А це означає, що щілина по суті стає точковим джерелом кільцевих хвиль, які в процесі розповсюдження збурюють великий сегмент того простору що знаходиться за перешкодою.

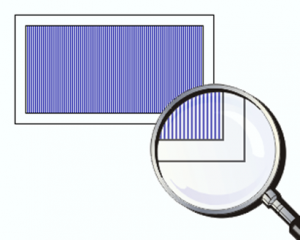
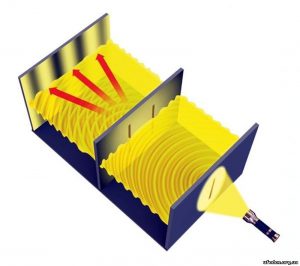
Дифракція хвиль на вузьких щілинах має надзвичайно велике практичне застосування. Адже якщо на шляху хвильового фронту зустрінеться не одна а дві, три чи багато дифракційних щілин, то кожна з них стане джерелом когерентних (узгоджених) хвиль.  А ці хвилі інтерферуючи між собою, створюють відповідну стійку інтерференційну картинку. Картинку, аналіз якої  дозволяє вирішувати велику кількість практично важливих задач.



Мал.116. В хвильовому потоці дифракційні щілини стають джерелами когерентних хвиль, які інтерферуючи між собою створюють відповідну інтерференційну картинку.

В оптиці, прилад який дозволяє отримувати потоки когерентних світлових хвиль і який представляє собою систему періодично розташованих паралельних, надзвичайно вузьких прозорих та непрозорих, або дзеркальних та дифузійних смужок, називають **дифракційною решіткою** (мал.117). Дифракційні решітки поділяються на прозорі та дзеркальні. Вони відрізняються тим, що в прозорих решітках чергуються оптично прозорі та оптично непрозорі смужки, а в дзеркальних – дзеркальні та дифузійні смужки. При цьому, в дзеркальних дифракційних решітках, роль щілин виконують тонкі дзеркальні смужки, а роль перешкод – дифузійні подряпини.

Основною характеристикою дифракційної решітки є величина, яка називається **періодом дифракційної решітки** і яка дорівнює загальній ширині пари прозора-непрозора (або дзеркальна-дифузійна) смужки (позначається d). Зазвичай, період дифракційної решітки не перевищує 0,01мм (d≤0,01мм). Це означає, що на кожному погонному міліметрі такої решітки міститься щонайменше 100 прозорих (дзеркальних) і 100 непрозорих (дифузійних) смужок, а по суті 100 перешкод та 100 щілин.

Мал.117.  Загальний устрій дифракційної решітки.

Принцип дії дифракційної решітки полягає в наступному. В потоці світла, кожна прозора (дзеркальна) щілина стає джерелом когерентних хвиль, які накладаючись одна на одну створюють відповідну інтерференційну картинку. Аналізуючи цю картинку та ту ситуацію яка призвела до її появи, можна отримати велику кількість корисної інформації, наприклад визначити довжину світлової хвилі.

Дійсно. Припустимо, що дифракційна решітка, період якої 0,01мм, знаходиться в потоці видимого (білого) світла. Розглянемо та проаналізуємо ту інтерференційну ситуацію, що виникає в довільно взятій точці екрану, наприклад в точці А (мал.118). Оскільки кожна щілина дифракційної решітки по суті є окремим точковим джерелом когерентних хвиль, то в точку А потрапляють хвилі практично від кожної щілини дифракційної решітки. Із всього різноманіття цих хвиль оберемо ті, хід яких описують хвильові промені МА та NА. Вибір саме цих променів пояснюється тим, що відстань між точками М і N є відомою і чисельно рівною періоду дифракційної решітки: |MN|=d=0,01мм=1·10-5м.

Оскільки в точках М і N фази коливань відповідних хвиль є однаковими (адже мова йде про одне і те ж світло), то можна стверджувати, що ті світлові хвилі які виходять з точок М і N, в точці А підсиляться тоді і тільки тоді, якщо на відрізку Δ=|NA|-|MA| поміститься ціле число довжин хвиль λ. Іншими словами, умову підсилення хвиль в точці А можна записати у вигляді Δ = nλ, де  n = 1; 2; 3; … – ціле число. А це означає, що довжину максимально підсиленої в точці А світлової хвилі, можна визначити за формулою λ = Δ/n.

мал.118. Аналізуючи інтерференційну картинку та ту ситуацію яка призвела до її появи, можна визначити довжину світлової хвилі.

Із аналізу трикутника МNК випливає, що Δ = dsinφ. З іншого боку, із аналізу взаємоповязаних трикутників МNК та АОО‘ ясно, що кути φ та φ‘ є чисельно рівними (φ=φ‘). При цьому, виходячи з того, що величина кута φ‘ є малою (а за умови b>>a, цей кут дійсно малий φ‘<10″), можна стверджувати:  sinφ=sinφ‘≅tgφ‘=a/b,  де а – відстань від точки О‘ до точки А; b – відстань від дифракційної решітки до екрану. Зважаючи на вище сказане можна записати:  λ = Δ/n = dsinφ/n = dsinφ‘/n ≅ dtgφ‘/n = da/bn.

Таким чином, довжину максимально підсиленої в точці А світлової хвилі, можна визначити за формулою  λ = da/bn  (\*). В цій формулі, d – відома паспортна характеристика дифракційної решітки (d=1·10-5м); а і b – відстані, які легко вимірюються. Що ж стосується числа n, то воно визначається на основі розуміння суті сформованої на екрані інтерференційної картинки. А ця суть посягає в наступному.

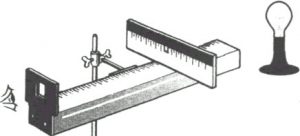
Якщо задана точка А буде знаходитись в центрі екрану (співпадатиме з точкою О‘), то оптична різниця ходу для всіх хвильових променів буде нульовою (Δ=0) і тому в цій точці інтерференційно підсилюватимуться всі хвилі видимого світла, тобто всі хвилі із діапазону довжин від 380нм до 760нм. Результатом цього інтерференційного підсилення, буде факт того, що на екрані, в околицях точки О‘ ми побачимо смугу білого світла (звичайно за умови, що дифракційна решітка знаходиться в потоці білого світла).

По мірі віддалення заданої точки від центральної осі, різниця ходу променів буде поступово збільшуватись. При цьому, якщо ця різниця буде меншою за найкоротшу з видимих хвиль (0<Δ<380нм), то у відповідних точках екрану всі хвилі будуть послаблюватись. А це означає, що відповідна ділянка екрану буде темною. Коли ж оптична різниця ходу світлових променів стане такою, що дорівнює одній (n=1) цілій довжині певної хвилі (спочатку хвилі фіолетового випромінювання, потім синього, голубого, зеленого, жовтого, оранжевого і накінець червоного), то у відповідній точці екрану будуть підсилюваться хвилі відповідної довжини, а отже і відповідного кольору. Іншими словами, на тій ділянці екрану для якої  380нм ≤ Δ ≤ 760нм  (тобто 1λф  ≤ Δ ≤ 1λч) ми побачимо певну кольорову спектральну картинку, яку називають **дифракційним спектром**.

Не важко збагнути, що на зміну дифракційному спектру першого порядку (n=1), прийде аналогічний спектр другого порядку (n=2), потім – третього (n=3) і т.д. Однак, потрібно мати на увазі що чутливість людського зору до світлових хвиль гранично малих та гранично великих довжин, є мізерно малою. Тому сусідні дифракційні спектри будуть фактично розділеними тонкими темними смугами.

Таким чинм, в результаті інтерференції тих когерентних хвиль які створює дифракційна решітка, на екрані можна побачити певну систему дифракційних спектрів, порядковий номер яких дорінює числу n в формулі (\*). Зазвичай, визначаючи довжину тієї чи іншої світлової хвилі, аналізують дифракційний спектр першого порядку (n=1). І це закономірно. Адже формула (\*) є тим більш правильною, чим менша величина кута φ‘. А для першого дифракційного спектру, ця величина є мінімально можливою. Крім цього, візуальна чіткість першої спектральної картинки є найкращою.

Вище описаній метод визначення довжини світлової хвилі є настільки простим та технічно невибагливим, що саме його застосовують в тих лабораторних роботах які проводяться в загальноосвітніх школах. Виконуючи таку роботу, застосовують простий прилад, який складається з деревяного бруска-лінійки, на якому встановлено рухомий екран-лінійка та нерухома дифракційна решітка (мал.119).



Мал.119. Загальний вигляд приладу, що дозволяє віміряти довжину світлової хвилі.

Факт того, що за допомогою гранично простого обладнання, можна визначити довжину світлової хвилі, є безумовно фантастичним. Адже мова йде про вимірювання довжини того об’єкту, швидкість руху якого майже в мільйон разів перевищує швидкість кулі. Об’єкту, який не можливо зупинити, загальмувати чи, скажімо затиснути між деталями вимірювального приладу. Об’єкту, довжина якого в сотні разів менша за граничну точність найточніших та найскладніших механічних мікрометрів.

На завершення зауважимо, що певними побутовими аналогами дифракційної решітки є ті компакт диски, які в потоці світла створюють красиві спектральні картинки. Якщо ж говорити про природні аналоги дифракційних решіток та дифракційних спектрів, то ними можна вважати ті чисельні ситуації в яких певні фрагменти тіл комах, птахів та інших істот, в потоці сонячного світла переливаються всіма барвами веселки.

Мал.120. Деякі приклади побутових та природніх аналогів дифракційних решіток та дифракційних спектрів.

**Словник фізичних термінів**

**Дифракція хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що в процесі свого розповсюдження хвилі заходять в область геометричної тіні тієї перешкоди що зустрічається на їх шляху (огинають перешкоди).

**Дифракційна решітка**, це прилад, який дозволяє отримувати потоки когерентних світлових хвиль і який представляє собою систему періодично розташованих паралельних, надзвичайно вузьких прозорих та непрозорих, або дзеркальних та дифузійних смужок.

**Дифракційним спектром** називають ту кольорову картинку яка відображає спектральний склад відповідного світла і яку отримують за допомогою дифракційної решітки.

**Контрольні запитання**

1.Назвіть основні причини дихракції хвиль.

2. Чому дихракція світлових хвиль є малопомітною?

3. Які основні візуальні прояви дихракції світла?

4. Поясніть загальний устрій та принцип дії дифракційної решітки.

5. Чому, визначаючи довжину світлової хвилі, зазвичай аналізують перший дифракційний спектр?

6. Чи є зображений на мал.119 прилад, різновидністю інтерферометра?

7. Чому в потоці світла компакт диски спектрально кольорові?

**Вправа 16.**

1.Дифракційні решітки мають по 50 та 100 штрихів на 1мм. Яка з них за однакових умов дає на екрані більш широкий дифракційний спектр?

2. Як змінюється ширина дифракційного спектру в процесі віддалення екрану від решітки?

3. Визначити довжину світлової хвилі, якщо в дифракційному спектрі максимум другого порядку виникає при оптичній різниці ходу хвиль 1,15мкм.

4. Яка ширина спектрів першого та другого порядків, створених дифракційною решіткою період якої 0,01мм? Відстань від решітки до екрану 40см.

5. Дифракційна решітка період якої 2мкм знаходиться в потоці монохроматичного світла. При цьому на екрані віддаленому від решітки на 1м, відстань між спектральними лініями другого та третього порядків становить 2,5см. Визначте довжину хвилі даного світла.

**§32. Поляризація світла.**

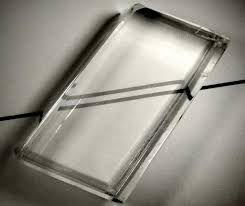
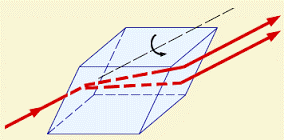
Явища інтерференції та дифракції безумовно доводять, що світло – це потік хвиль. Однак ці явища жодним чином не вказують на те, які це хвилі – поздовжні чи поперечні. Початково передбачалось, що світлові хвилі схожі на звукові, тобто такі які розповсюджуються в певному пружному середовищі (ефірі), і що тому вони є поздовжніми. Однак деякі експериментальні факти вказували на поперечність світлових хвиль. Зважаючи на ці факти, Огюстен Френель ще в 1821 році був змушений визнати: світло має властивості поперечних хвиль. Звичайно, з точки зору теорії речовинного ефіру, такий висновок був дивним. Втім, вчені наділили світловий ефір таким букетом дивних та суперечливих властивостей, для якого ще одна дивність не мала суттєвого значення.

Лише в 1865 році, ті факти які вказували на поперечність світлових хвиль отримали своє теоретичне пояснення. В цьому році Джеймс Максвел, на основі аналізу створеної ним теорії електромагнітного поля, дійшов висновку: **світло, це одна з різновидностей електромагнітних хвиль.** А це означало, що світлові хвилі є поперечними. Адже згідно з теорією Максвела, електромагнітна хвиля представляє собою хвильове збурення електромагнітного поля, яке характеризується взаємоповязаними коливаннями його основних параметрів – напруженості електричного поля **Е** та індукції магнітного поля **В**. При цьому теорія стверджувала, що коливання векторів **Е**і **В** відбуваються в площині яка перпендикулярна (поперечна) до напрямку розповсюдження хвилі.

Електромагнітні хвилі мають ту малоприємну особливість, що їх практично не можливо представити у вигляді простої наочної моделі. Намагаючись бодай якось спростити модельне представлення електромагнітної хвилі, в науковій практиці зазвичай говорять не про взаємоповязані коливання векторів **Е** і **В**, а лише про коливання вектора  **Е**. Ми не будемо порушувати цю добру традицію і в подальшому, світлові хвилі будемо представляти у вигляді поперечнх коливань вектора **Е**.

Одним з тих явищ яке безумовно вказує на поперечність світлових хвиль є так звана поляризація світла. **Поляризація світла** це явище, суть якого полягає в тому, що за певних обставин природнє неполяризоване світло стає поляризованим. Пояснюючи дане визначення можна сказати наступне. Те світло яке створюють звичайні природні та штучні джерела, по суті є результатом інтенсивного хаотичного руху величезної клькості заряджених частинок. Ця хаотичність передбачає не лише факт того, що кожний дискретний рух зарядженої частинки породжує хвилю певної індивідуальної довжини. А й факт того, що ця хвиля має свою індивідуальну площину коливань вектора **Е**. При цьому ясно, що те світло яке є результатом хаотичного руху заряджених частинок, неминуче складається з хвиль не лише хаотично різних довжин, а й хаотично різних орієнтацій вектора **Е**. Таке світло називають **неполяризованим** або **природнім**.

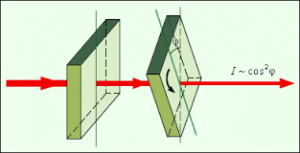
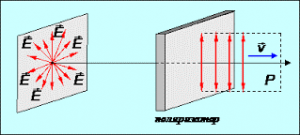
Пояснюючи суть та прояви того явища яке називається поляризацією світла, можна сказати наступне. Як відомо, однією з визначальних ознак кристалічності тіла, є його **анізотропність**. Це означає, що в різних просторових напрямках фізичні властивості одного і того ж кристалу (а точніше, монокристалу) можуть бути суттєво різними. Прояви анізотропії бувають різними. Одні кристали мають яскраво виражену анізотропію механічних властивостей, інші – теплових, треті – електричних, а четверті – оптичних. Прикладом оптично анізотропних кристалів є кристали з **подвійним променезаломленням**. В цих кристалах світлові промені, в одних напрямках залолюються як в звичайних оптично прозорих речовинах, а в інших напрямках – заломлюються таким чиним, що падаючий промінь розкладається на два заломлених промені. Результатом такого подвійного заломлення є факт того, що ті предмети які розглядаються через відповідний кристал виглядають роздвоєними (мал.121).

Мал.121. В кристалі з подвійним променезаломленням, світловий промінь розкладається на дві складові.

Кристали з подвійним променезаломленням (ісландський шпат, турмалін, тощо) дозволяють здійснити рід важливих оптичних досліджень, в тому числі і тих які пояснюють суть поляризації світла та підтверджують поперечність світлових хвиль. Опишемо одне з таких досліджень.

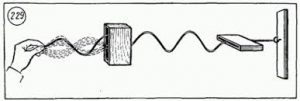
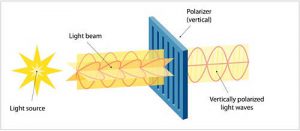
Припустимо, що в нашому розпоряджені є дві прямокутні турмалінові пластини, площина яких є паралельною оптичній осі кристалу, тобто тому напрямку в якому подвійного променезаломлення не відбувається. Припустимо, що дані пластини взаємно паралельні та мають спільну вісь обертання. (мал.120). Якщо на цю оптичну систему направити потік звичайного (неполяризованого) світла, то неодмінно з’ясується наступне. 1) Інтенсивність того світлового потоку що є вихідним з першої пластини приладу, за будь якої просторової орієнтації пластини залишається незмінною і практично вдвічі меншою за інтенсивність вхідного потоку. 2) Інтенсивність того світлового потоку що є вихідним з другої пластини приладу, визначальним чином залежить від відносної кутової орієнтації пластин системи. При цьому: а) якщо оптичні осі пластин є взаємно паралельними, то інтенсивність вихідного потоку є максимальною і практично рівною інтенсивності вхідного потоку; б) по мірі того, як кут між оптичними осями пластин збільшується інтенсивність вихідного світлового потоку зменшується; в) якщо ж оптичні осі пластин системи стають взаємно перпендикулярними, інтенсивність вихідного світлового потоку стає практично нульовою.

Мал.122. Інтенсивність того світлового потоку що є вихідним з другої турмалінової пластини, залежить від відносної кутової орієнтації пластин.

Результати вище описаних експериментів, можна пояснити лише в тому випадку, якщо виходити з того, що світлові хвилі є поперечними. А в гранично спрощеному вигляді це пояснення полягає в наступному. Будучи певним чином орієнтованим відносно світлового потоку, кристал турмаліну, пропускає лише ті світлові хвилі в яких коливання вектора **Е** відбуваються в певній площині – **площині поляризації**. При цьому хвилі з іншими площинами коливань, через даний кристал не проходять. Ясно, що коли кристал турмаліну знаходиться в потоці неполяризованого світла, то за будь якої кутової орієнтації цього кристалу, завжди знайдеться певна кількість світлових хвиль, в яких коливання вектора **Е** відбуваються в потрібній площині. Ці хвилі проходять через кристал і стають частиною того світла яке називається **поляризованим**, тобто таким, в якому коливання вектора **Е** відбуваються в строго визначеній площині – площині поляризації. Не менш очевидно і те, що коли на шляху поляризованого світла поставити ще один аналогічний кристал турмаліну, то в залежності від його кутової орієнтації, кількість того світла яке проходить через цей кристал має певним чином змінюватись від певної максимальної величини до нуля і навпаки.

Іноді, суть поляризації пояснюють на прикладі наступної механічної моделі. (Таку модель легко уявити, але надзвичайно складно реалізувати на практиці). Візьмемо довгу пружну мотузку і здійснюючи складні поперечно-обертальні коливання, створимо відповідну поперечно-обертальну хвилю (мал.123). Якщо на шляху цієї складної поперечно-обертальної хвилі зустрінеться непереборна перешкода з вузькою щілиною в ній, то на виході ми отримаємо просту поперечну хвилю, площина коливань якої співпадає з площиною щілини. Якщо ж на шляху таким чином “поляризованої” хвилі, поставити ще одну аналогічну перешкоду, то в залежності від її кутової орієнтації, “поляризована” хвиля проходитеме через щілину, або не проходитеме через неї.

Мал.123. Механічна модель, яка спрощено ілюструє суть поляризації світла.

Звичайно, поляризацію світла не припустимо зводити до механічного пропускання чи не пропускання хвиль певної направленості коливань. Поляризація світла, це надзвичайно складний квантово-хвильовий процес, в якому елементи кристалічної структури речовини, не просто сортирують світлові хвилі, а й активно трансформують їх. І це очевидно. Адже якби з потоку неполяризованого світла кристал турмаліну вибирав лише хвилі певної площини коливань, то вихідний світловий потік мав би бути мізерно малим. Насправді ж, через поляризуючий кристал проходить близько 50% попередньо неполяризованого світла.

Дослідження показують, що світло поляризується не лише в процесі проходження через оптично анізотропні кристали. В тій чи іншій мірі, поляризація світла відбувається при його відбиванні від оптично непрозорих діелектричних поверхонь, при заломлені світла оптично прозорими ізотропними діелектриками. Світло поляризується в спеціально створених анізотропних середовищах, в потужних електричних та магнітних полях, тощо. Прилади, за допомогою яких створюють поляризоване світло називаються **поляризаторами**. Найпростішими поляризаторами є спеціальні поляризаційні призми, поляроїдні плівки та діелектричні дзеркала. Зазвичай, повністю поляризованим є те світло яке випромінюють квантові генератори (лазери).

Поляризація світла широко застосовується в сучасні науці та техніці. Поляризаційними методами ідентифікують кристалічні речовини; вивчають структуру кристалів; визначають показники заломлення світла непрозорих діелектриків; вимірюють концентрації речовин в розчинах; вивчають розподіл механічних напруг в деталях складної конфігурації; забезпечують сприйняття стереозображень, тощо.

Потенційно привабливим, але до тепер не реалізованим напрямком застосування поляризованого світла, є проблема боротьби з осліплюючою дією світла фар на транспорті. На перший погляд, рішення проблеми є очевидно простим: на фари та лобове скло автомобілів потрібно нанести тонкі поляризаційні плівки. Однак, як це часто буває, практичній реалізації простого рішення заважає ціла низка “але…”. Достатньо сказати, що в процесі перетворення неполяризованого світла в поляризоване, практично 50% світлової енергії перетворюється на теплоту. А для такої потужної освітлювальної системи як фари автомобіля, ця обставина є непрйнятно негативною.

**Словник фізичних термінів**

**Поляризація світла** це явище, суть якого полягає в тому, що за певних обставин природнє неполяризоване світло стає поляризованим.

**Неполяризованим (природнім) світлом** називають таку сукупність світлових хвиль, в якій коливання векторів **Е** відбуваються у всіх можливих площинах.

**Поляризованим світлом** називають таку сукупність світлових хвиль, в якій коливання векторів **Е** відбуваються в певній, строго визначеній площині.

**Контрольні запитання**

1.Які хвилі називають поздовжніми, а які поперечними?

2. Чому електромагнітні хвилі є поперечними?

3. Чому те світло яке створюють звичайні джерела є неполяризованим?

4. В чому полягає анізотропія кристалів з подвійним променезаломленням.

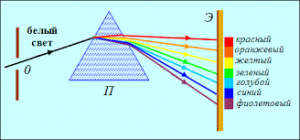
5. В чому суть поляризації світла?

6. Які факти вказують на те, що поляризація світла не зводиться до простого пропускання хвиль з певною площиною коливань вектора **Е**?

7. До яких наслідків призвів би факт того, що певне покриття на автомобільних фарах, затримує половину генерованої ними світлової енергії?

**§33. Дисперсія світла.**

Вивчаючи закони геометричної оптики, ми з’ясували, що для даної пари середовищ, відношення синусу кута падіння променя до синусу кута його заломлення, є постійною величиною: sin?/sin?=n=const. Однак, дослідження показують, що дане твердження не є безумовно правильним. Дослідження показують, що на межі двох оптично різних середовищ, світлові промені різних довжин (різних кольорів) заломлюються суттєво по різному: хвилі менших довжин заломлюються сильніше аніж хвилі більших довжин (мал.124). Іншими словами, експериментальні факти вказують на те, що показник заломлення світла залежить не лише від оптичних властивостей відповідного середовища, а й від довжини хвиль того світла що заломлюється. Цю залежність називають **дисперсією світла** (від лат. dispersio – розсіювання).



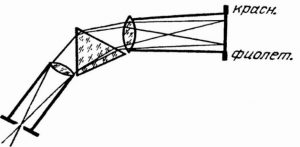
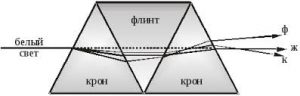
Мал.124. На межі двох оптично різних середовищ, хвилі різних довжин (різних кольорів) заломлюються суттєво по різному.

Коли ми стверджуємо, що абсолютний показник заломлення даного середовища залежить від довжини хвилі заломлюваного світла, то по суті це означає, що в одному і тому ж середовищі, хвилі різних довжин (різних кольорів) мають суттєво різні швидкості. Адже абсолютний показник заломлення світла, фактично показує у скільки разів швидкість світла в даному середовищі (v) менша за його швидкість в вакуумі (с):  sinα/sinγ=n=c/v. Про те, чому в одному і тому ж середовищі червоне світло розповсюджується швидше за зелене, а зелене – швидше за синє, ми поговоримо дещо пізніше. Наразі ж просто констатуємо факт того, що швидкість розповсюдження світла в тому чи іншому середовиші, певним чином залежить від довжини хвилі (кольору) цього світла, і що тому на межі двох оптично різних середовищ, світло різних кольорів заломлюється суттєво по різному.

Потрібно зауважити, що в науковій практиці, терміном **дисперсія світла** позначають як залежність абсолютного показника заломлення середовища від довжини хвилі заломлюваного світла (n=ƒ(λ)), так і сукупність тих оптичних явищ які обумовлені цією залежністю. Та як би там не було, а результатом дисперсії є факт того, що в процесі заломлення, біле світло певним чином розкладається на його складові кольори.

Ви можете запитати: “Якщо на межі двох оптично прозорих середовищ, біле світло розкладається на його складові кольори, то чому  ж ми не бачимо результатів цього розкладання при проходженні світла через віконні  шибки та інші оптично прозорі тіла?” Відповідаючи на це слушне запитання можна сказати наступне. По перше, різниця між показниками заломлення, а відповідно і кутами заломлення, хвиль різних кольорів є мізерно малою. Тому ширина тієї спектральної картинки яка утворюється при проходженні світла через такі тонкі предмети як віконне скло, є настільки малою, що практично не фіксуються зоровою системою  людини. По друге, ті оптично прозорі предмети з якими ми маємо справу в повсякденному житті, зазвичай освітлюються не окремими світловими променями, а суцільними світловими потоками. В такій ситуації результатом розкладання кожного променя на його кольорові складові, та накладання цих складових на продукти розкладання сусідніх променів, буде все те ж біле світло.

Картину прогнозованого дисперсійного розкладання світла, отримують за допомогою спеціальних приладів які називаються **спектроскопами**, точніше – **призмовими** або **дисперсійними спектроскопами**. Схема принципового устрою простого призмового спектроскопу (так званого двох трубного спектроскопу) представлена на мал.125а. Цей спектроскоп працює наступним чином. Через вузьку щілину вхідної трубки приладу, світло потрапляє на захищену від сторонніх світлових впливів склянну тьохгранну призму. Проходячи через цю призму, світло розкладається на його складові кольори та потрапляє у вихідну зорову трубку приладу.

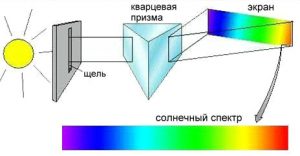
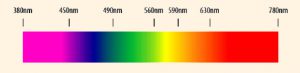
Мал.125. Схема принципового устрою: а) двох трубного спектроскопу; б) спектроскопу прямого зору.

Суттєвим недоліком двох трубного спектроскопу є те, що в ньому напрямки вхідного та вихідного світлових потоків є різними, і тому відповідний прилад не може бути достатньо компактним. Крім цього, такий спектроскоп не дозуволяє створювати достатньо якісні спектральні картинки. Цих недоліків позбавлений так званий спектроскоп прямого зору. Цей спектроскоп відрізняється тим, що його дисперсійна призма складається з трьох окремих трьохгранних призм (мал.125б). Матеріал та кутові параметри цих призм підібрані таким чином, щоб по перше ефективно перетворювати вхідний світловий потік на якісну спектральну картинку, а по друге – не змінювати загальний напрям світлового потоку. Спектроскоп прямого зору характеризується достатньо високою якістю створюваних ним спектрів, компактністю та зручністю в роботі.

Ту спектральну картинку яку отримують за допомогою дисперсійного спектроскопа називають **дисперсійним спектром** (мал.126а). Дисперсійні спектри мають один суттєвий недолік. І цей педолік полягає в тому, що вони певним чином деформовані. Деформовані в тому сенсі, що синьо-фіолетова частина дисперсійного спектру є надмірно розтягнутою, натомість червоно-оранжева частина – надмірно стиснутою. Більше того, абсолютно однакові за формою але виготовлені з різних матеріалів (скажімо, з різних сортів скла) призми, можуть створювати суттєво різні дисперсійні спектри. Різні не в сенсі набору кольорів (довжин хвиль), а в сенсі масштабу розподілу цих кольорів в спектральній картинці. Такий стан речей пояснюється тим, що залежність показника заломлення світла від довжини заломлюваних хвиль, є по перше нелінійною, а по друге індивідуальною.

Ясно, що деформованість дисперсійного спектру, не є його позитивною рисою. Адже аналізуючи такий спектр, можна зробити висновок про те, що в видимому (сонячному) світлі синьо-фіолетових хвиль набагато більше аніж червоно-оранжевих. А це абсолютно не відповідає дійсності. Аналізуючи дисперсійний спектр, потрібно розуміти, що ви маєте справу з приладом, вимірювальна шкала якого є нерівномірною. І ця нерівномірність, вточності відображає нелінійність залежності показника заломлення світла даного середовища, від довжини заломлюваних хвиль.

Спектри з лінійним розподілом довжин хвиль, отримують за допомогою **дифракційних спектроскопів**. В таких спектроскопах, функцію дисперсійної призми виконує якісна дифракційна решітка. В **дифракційному спектрі** (мал.126б), розподіл хвиль за їх довжинами, а отже і кольорами, є строго лінійним. І в цьому сенсі, дифракційні спектри є більш зручними та об’єктовними. Втім, дифракційні та дисперсійні спектри по суті відрізняються не більше, аніж ті вимірювальні прилади, шкали яких є рівномірними та нерівномірними.

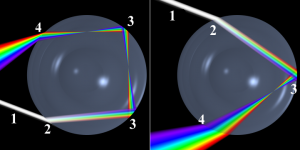
Мал.126. Дисперсійний (а) та дифракційний (б) спектри, це прилади з відповідно нерівномірною та рівномірною вимірювальною шкалою.

Загально відомим прикладом природнього дисперсійного спектру є веселка або райдуга (райська дуга). Веселка представляє собою різнобарвну дугу, в якій прийнято виділяти сім кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій та фіолетовий. Не рідко над основною дугою можна побачити ще одну більш широку та менш яскраву веселкову дугу, яка відрізняється від основної тим, що її кольори мають зворотню послідовність.

Уважний спостерігач може помітити, що весела з’являється лише на фоні освітленої Сонцем завіси дощу і тільки в тому випадку коли ця завіса знаходиться перед спостерігачем, а Сонце – позаду нього. Крім цього, він може звернути увагу і на те, що веселка з’являється лише в тому випадку, коли кут нахилу Сонця над лінією горизонту не надто великий (зазвичай не більший 40°) і що чим менший цей кут, тим вищою є дуга веселки.

Пояснюючи фізичну суть того явища яке називається веселкою, звернемось до експерименту. В рамках цього експерименту, направлений пучок білого світла пропустимо через заповнену водою склянну кулю (мал.127). При цьому неодмінно з’ясується, що в процесі проходження через тіло кулі, біле світло розкладається на його складові кольори. Кількісний аналіз результатів експерименту показує. Якщо при проходженні через водяну кулю, світло зазнає одного внутрішнього відбивання (мал.127а), то вихінні кольорові промені утворюють з напрямком вхідних променів кут від 40° до 42° (відповідно для фіолетового та червоного промунів). Якщо ж в процесі проходження через кулю, світло зазнає двох внутрішніх відбивань (мал.127б), то послідовність кольорів стає протилежною і вони утворюють кути від 50,5° до 54° (відповідно для червоного та фіолетового променів).

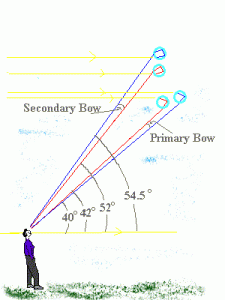
При цьому потрібно зауважити, що та спектральна картинка яка утворюється після дворазового внутрішнього відбивання світла, буде набагато тмянішою за ту, яка утворюється після одноразового внутрішнього відбивання. І це закономірно, адже при кожному внутрішньому відбиванні, велика частина світлової енергії виходить за межі водяної кулі.



Мал.127.  В процесі проходження через водяну кулю, біле світло розкладається на його складові кольори.

В потоці сонячного світла, кожна краплина дощу по суті є тією маленькою водяною кулею, проходячи через яку сонячне світло дисперсійно розкладається, та утворює відповідну дисперсійну картинку. При цьому, той спостерігач що знаходиться на поверхні землі, може бачити дві кольорові дуги, перша з яких починається з фіолетового кольору і закінчується червоним, друга – є набагато тмянішою і починається з червоного кольору а закінчується фіолетовим.

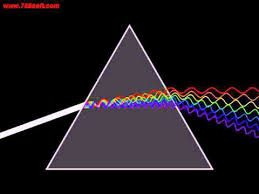
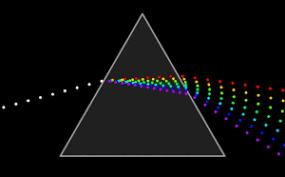
Звичайно, краплини дощу не висять у повітрі, а швидко падають. Тому певна краплина приймає участь в формуванні мізерного фрагменту веселки лише короткий проміжок часу. Однак веселку створює не одна, не дві , а мірріади крапель. Ці краплі змінюють одна одну так швидко, що око людини не помічає цих змін. При цьому спостерігач фактично бачить не ту картинку яку створює певна окрема крапля, а усереднений результат масштабного динамічного процесу, в якому приймають участь мірріади рухомих крапель.

Мал.128.  Веселка, це результат дисперсійного розкладання сонячного світла на його складові кольори, яке відбувається в процесі проходження світла через краплини дощу.

В певному сенсі, та велична картина яка називається веселкою, схожа на те що ми бачимо на теле- та кіно- екранах. Адже дивлячись телевізор, ми не помічаємо факту того, що за кожну секунду на його екрані з’являється та зникає 25 нерухомих картинок. Ми не помічаємо кожну окруму картинку, а сприймаємо лише їх усереднений результат. По суті, веселка і є тим природнім атмосферним кінофільмом, який створює сонячне світло та неперервний потік краплинок дощу.

Завершуючи розмову про дисперсію світла зауважимо, що це явище не є таким яке безумовно вказує на хвильові властивості світла. По суті, дисперсія світла є тим явищем, яке з практично онаковим успіхом можна пояснити як в рамках хвильової, так і в рамках квантової оптики.

Мал.129. Дисперсію світла можна пояснити як хвильовими так квантовими (корпускулярними) властивостями світла.

**Словник фізичних термінів**

**Дисперсією світла** називають сукупність тих оптичних явищ, які обумовлені залежністю абсолютного показника заломлення середовища від довжини хвилі заломлюваного світла.

**Спектроскоп** – це прилад, в якому світло певним визначеним чином розкладається на його складові кольори. За способом розкладання світла, спектроскопи поділяються на дисперсійні та дифракційні.

**Веселка (райдуга)** – це атмосферне оптичне явище, суть якого полягає в тому, що сонячне світло заломлюючись та відбиваючись в краплинках неперервного потоку дощу, дисперсійно розкладається на його складові кольори і утворює відповідну кольорову дугу.

**Контрольні запитання**

1.Чи є закон заломлення світла безумовно правильним? Чому?

2. Якщо на межі двох оптично прозорих середовищ, світло розкладається на його складові кольори, то чому ми не бачимо результатів цього розкладання дивлячись на те світло що проходить через віконне скло?

3. Поясніть загальний устрій та принцип дії дисперсійного спектроскопа.

4. Який основний недолік дисперсійного спектру та які причини його появи?

5. Що називають хроматичною аберацією? В чому вона проявляється? Які методи боротьби з нею?

6. За яких загальних умов спостерігається веселка?

7. Чому веселка буває подвійною і чому верхня веселкова дуга набагато тмяніша за нижню?

8. В чому схожісьть між кіно та веселкою?

**§34. Види спектрів. Спектральний аналіз.**

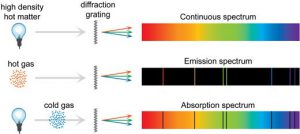
Пропускаючи вузький пучок світла через склянну трьохгранну призму, Ньютон спостерігав фантастично-дивовижну подію, перетворення чистого безбарвного світла на прекрасну райдужну картинку. Факт того, що всі ці райдужні кольори дивовижним чином виникали з звичайного безбарвного світла, став підставою для того, щоб цю райдужно-кольорову картинку назвати **спектром**, що в змістовному перекладі означає дивовижне мариво (від лат. spektrum – мариво).

В різних розділах сучасної науки та в різних контекстах, термін “спектр” може мати суттєво різні відтінки значень. Зокрема спектром називають загальну сукупність значень певної величини; загальну сукупність довжин хвиль що містяться в тому чи іншому випромінюванні; загальну сукупність тих гармонічних коливань на які можна розкласти дане складне коливання, тощо. Однак, якщо говорити про оптику, то в ній **спектром** називають ту кольорову картинку, яку отримують шляхом розкладання світла спеціальним приладом (спектроскопом, спектрографом, спектрометром, тощо), а також ту сукупність довжин (частот) електромагнітних хвиль, яка відповідає цій картинці.

За різними класифікаційними ознаками, спектри поділяються на дисперсійні та дифракційні, на спектри випромінювання та спектри поглинання, на спектри суцільні, лінійчаті та смугасті. Про дисперсійні та дифракційні спектри ми говорили в попередньому параграфі. Тому наразі поговоримо про ті різновидності спектрів які називаються суцільними, лінійчатими та смугастими, а також про спектри випромінювання та спектри поглинання.

Якщо даний спектр характеризує параметри того світла яке випромінюється тим чи іншим об’єктом, то цей спектр називають **спектром випромінювання**. Зазвичай, говорячи про спектри випромінювання мають на увазі спектр того світла, яке випромінюється первинним джерелом світла: Сонцем, полум’ям свічки, лампочкою розжарювання, лампочкою денного світла, тощо. Наприклад, ті спектри які створюють нагріта спіраль лампочки розжарювання (мал.130а) та нагрітий до високої температури газ гелій (мал.130б), є спектрами випромінювання.

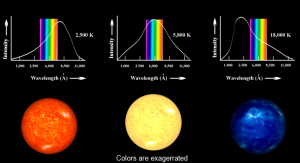
Якщо даний спектр характеризує параметри того світла яке поглинається тим чи іншим об’єктом, то такий спектр називають **спектром поглинання**. Зазвичай, говорячи про спектр поглинання, мають на увазі спектр того світла яке поглинається певним відносно холодним об’єктом при проходженні крізь нього світла повного спектрального складу. Наприклад, якщо через шар холодного гелію (мал.130в) пропустити біле світло (світло повного спектрального складу), то в достатньо якісному спектроскопі, можна побачити певний набір тонких темних ліній. Сукупність цих темних ліній і є спектром поглинання гелію.



Мал.130. Спектри паділяються на спектри випромінювання (а,б) та спектри поглинання (в).

За загальним виглядом спектральної картинки, а отже і за частотним складом тих електромагнітних хвиль які утворюють цю картинку, спектри поділяються на суцільні, лінійчаті та смугасті. **Суцільним спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою суцільну спектральну картинку яка складається з усіх спектральних кольорів видимого світла і якій відповідає повний набір електормагнітних хвиль з діапазону від 380нм до 760нм (мал.130а). Суцільний спектр є результатом інтенсивного теплового (хаотичного) руху частинок речовини.   Дослідження показують, що всі тверді та рідкі тіла, а також гази високої густини (наприклад такої як поверхня Сонця), будучи нагрітими до достатньо високих температур, випромінюють світло суцільного спектру. При цьому, спектральний склад цього світла не залежить ні від хімічного складу речовини, ні від її агрегатного стану, ні від її температури.

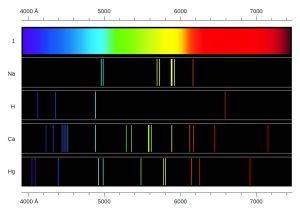
Інша справа, загальний колір того світла яке дає суцільний спектр. Адже цей колір фактично відображає не спектральний склад світла, а відносну концентрацію в ньому світлових хвиль відповідних довжин, і є таким що залежить від температури речовини. Наприклад температура поверхні Сонця близька до 5800К. При цій температурі, пік тієї кривої яка описує розподіл енергії в спектрі світла, припадає на ту зону в якій практично рівномірно представлені всі хвилі спектру видимого світла (131б). А ці хвилі у своїй сукупності і дають те біло-жовте світло яким світить Сонце. При зменшені температури поверхні (мал.131а), пік кривої розподілу енергії зміщується в сторону червоного кольору. А це означає, що в спектрі світла переважатимуть червоно-оранжеві кольори і тому поверхня набуватиме відповідного червоно-оранжевого кольору. Якщо ж температура поверхні збільшується (мал.131в), то пік кривої розподілу енергії зміщується в сторону синього кольору, що відповідно змінює і колір поверхні. А це означає, що за кольором повершні, можна достатньо точно визначити температуру цієї поверхні.



Мал.131. Загальний колір того світла що дає суцільний спектр, певним чином залежить від температури джерела світла.

Факт того, що розжарені тверді та рідкі тіла, а також гази високої густини, випромінюють повний набір електромагнітних хвиль видимого світла, є цілком закономірним. Адже мова йде про тіла з надзвичайно великою концентрацією частинок речовини. Частинок, які в процесі інтенсивного теплового, а отже хаотичного руху, випромінюють хвилі всіх можливих довжин (частот). Іншими словами, суцільний спектр випромінювання є результатом інтенсивного хаотичного (теплового) руху величезної кількості щільно упакованих заряджених частинок.

**Лінійчатим спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою певний набір тонких спектральних ліній. Лінійчаті спектри дають системи обособлених енергетично збуджених атомів, зокрема розріджені пари та гази атомарного складу. При цьому, кожна різновидність атомів, дає свій неповторний лінійчатий спектр (мал.132). Даний факт пояснюється тим, що лінійчатий спектр є відображенням тих процесів які відбуваються в енергетично збудженому атомі. В певному сенсі, лінійчатий спектр можна назвати фотографією внутрішнього устрою атома. А оскільки внутрішній устрій хімічно різних атомів є різним, то відповідно різними є і їх спектральні зображення.



Мал.132. Кожна різновидність атомів дає свій неповторний лінійчатий спектр.

Потрібно зауважити, що кількість та чіткість тих ліній, які можна побачити в спектроскопі, визначальним чином залежить від якості цього спектроскопа. Скажімо, якщо в простенькому демонстраційному спектроскопі лінійчатий спектр парів натрію виглядає як сукупність двох близько розташованих жовтих ліній, то в значно потажнішому та якіснішому лабораторному спектроскопі, можна побачити систему з десяти пар подібних ліній. Крім цього, потрібно мати на увазі, що в звичайному спектраскопі, ми бачимо лише видиму частину лінійчатиго спектру, і що певна частина цього спектру може знаходитись в області невидимого інфрачервоного та ультрафіолетового випромінювання.

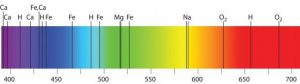
**Смугастим спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою певний набір відносно широких спектральних смужок, кожна з яких в свою чегу, складається з великої кількості тонких, близько розташованих спектральних ліній. Іншими словами, смугастий спектр – це складна різновидність лінійчатого спектру. Смугасті спектри дають системи обособлених, енергетично збуджених молекул, зокрема розріджені газа молекулярного складу. При цьому, кожна різновидність молекул дає свій неповторний смугастий (складний лінійчатий) спектр. І не важко збагнути, що той складний лінійчатий спектр, який називають смугастим, є відображенням тих складних процесів що відбуваються в енергетично збуджених молекулах.



Мал.133. Спектри випромінювання поділяються на суцільні, лінійчаті та смугасті (складні лінійчасті).

Спектри випромінюання можуть бути не лише суцільними, лінійчатими та смугастими, а й **комбінованими**. Наприклад, спектр того світла яке випромінює заповнена розрідженим воднем (Н2) газорозрядна трубка, є певною комбінацією лінійчатого спектру атомів водню, та смугастого спектру молекул водню. Або, наприклад, спектр того випромінювання яке створює лампа денного світла, є певною комбінацією лінійчатого спектру розріджених парів наявного в лампі металу, та близького до суцільного, спектру тієї люмінісцируючої речовини яка нанесена на внутрішню поверхню склянного корпусу лампи.

В 1859 році, німецький фізик Густав Кірхгоф (1824-1887) з’ясував, що лінійчаті спектри випромінювання та поглинання будь якої речовини є взаємно оберненими. Це означає, що коли нагріта речовина випромінює певний набір електромагнітних хвиль, то в холодному стані, вона поглинає точно такий же набір хвиль. Зважаючи на цей факт, не важко пояснити походження тих тонких темних ліній які можна побачити в спектрі сонячного світла (мал.134). Ці лінії були відкриті та описані в 1814 році німецьким фізиком Йозефом Фраунгофером (1787-1826) і тому називаються **фраунгоферовими лініями**.



Мал.134. В спектрі сонячного світла міститься велика кількість тонких темних спектральних ліній, які прийнято називати фраунгоферовими лініями.

Пояснюючи походження фраунгоферових ліній, можна сказати наступне. Густа та гаряча поверхня Сонця (фотосфера) постійно випромінює надпотужний світловий потік суцільного спектру. Проходячи через відносно прохолодну та відносно розріджену сонячну атмосферу (сонячну корону), а також через атмосферу Землі, сонячне світло частково поглинається атомами та молекулами цих атмосфер. При цьому, в початково суцільному спектрі, з’являється величезна кількість тонких темних ліній. Ліній, які відображають хімічний склад сонячної та земної атмосфер. Потрібно зауважити, що в спектроскопах малої потужності можна побачити незначну кількість, найбільш “яскравих” фраунгоферових ліній. Загалом же, цих ліній понад 20 тисяч.

Факт того, що кожна речовина має свій неповторний спектральний відбиток, лежить в основі так званого спектрального аналізу. **Спектральний аналіз**, це метод визначення хімічного складу речовини та інших її параметрів, на основі аналізу лінійчатого спектру цієї речовини. (Відразу ж зауважимо: оскільки смугастий спектр є складною різновидністю лінійчатого спектру, то в подальшому ці спектри ми будемо називати лінійчатими). Суть спектрального аналізу полягає в наступному. Від об’єкту досліджень, отримують лінійчатий спектр випромінювання або поглинання. Аналізують склад, яскравість та особливості даного спектру і на основі цього аналізу роблять відповідні висновки. Зокрема, за набором характерних спектральних ліній, визначають якісний склад речовини, тобто загальну сукупність наявних в ній атомів та молекул. За яскравістю цих ліній, визначають кількісний склад речовини. За зсувом спектральних ліній, визначають швидкість та напрям руху відповідного об’єкту, наприклад тієї чи іншої зірки або галактики.

Спектральний аналіз вигідно відрізняється від традиційних методів хімічного аналізу. До числа його безумовних переваг відносяться:

1.Надзвичайно висока чутливість та точність. Чутливість сучасного спектрального аналізу така, що дозволяє виявити речовину навіть в тому випадку коли її концентрація не перевищує 10-11г/см3.

2. Спектральний аналіз дозволяє точно визначати хімічний склад тих об’єктів які знаходяться на недосяжно великих відстанях, наприклад таких як Сонце, зірки, галактики, космічні туманності, тощо.

3. Спектральний аналіз є гранично універсальним методом досліджень, який дозволяє визначати хімічний склад практично будь якої речовини, починаючи від простих неорганічних речовин і закінчуючи надскладними біологічними структурами.

4, Спектральний аналіз дозволяє розрізняти навіть такі атоми, які методами хімічного аналізу розрізнити практично неможливо. Ці різновидності хімічно однакових атомів називають **ізотопами**.

5. Спектральний аналіз дозволяє визначати не лише хімічний склад того чи іншого об’єкту, а й його температуру, параметри руху, параметри кристалічної структури, внутрішній устрій атомі, тощо.

6. Спектральний аналіз характеризується високою технологічністю, сумісністю з електронними системами обчислень, аналізу та управління, високою швидкістю проведення аналізу, відносно низькою собівартістю, надійністю та іншими чеснотами.

Класичною ілюстрацією можливостей спектрального аналізу є історія відкриття гелію – речовини, атом якої в таблиці хімічних елементів займає позицію №2. Ця історія показова тим, що гелій відкрили не на Землі, а на Сонці. Як відомо, гелій відноситься до числа так званих інертних газів. При цьому серед інертних, він найінертніший. Це означає, що гелій практично не проявляє себе в жодній хімічній реакції. Хімічний же аналіз базується на аналізі результатів тих реакцій які відбуваються з тими чи іншими атомами (молекулами). І якщо такі реакції не відбуваються, то для хіміків відповідні атоми просто не існують.

В 1868 році, аналізуючи отриманий в момент повного сонячного затемнення, лінійчатий спектр сонячної атмосфери (сонячної корони), вчені звернули увагу на те, що в цьому спектрі є декілька яскравих ліній, які не відповідали жодному з відомих на той час атомів. Це означало, що до складу сонячної атмосфери, а отже і до складу Сонця, входить якийсь невідомий хімічний елемент. Цей відкритий на Сонці елемент, назвали **гелієм**, тобто – сонячним (від грец. Helios – Сонце). Лише в 1895 році, тобто через 27 років після відкриття на Сонці, вченим вдалося відшукати гелій і на Землі. При цьому з’ясувалося, що гелій має багато виняткових властивостей, які сприяли його широкому застосуванню в сучасній науці і техніці.

Загалом же, методами спектрального аналізу було відкрито близько 30 хімічних елементів, зокрема всі інертні гази, цезій, іридій, рубідій, талій та інші.

На завершення додамо. Якщо мова йде про хімічно складні речовини, то їх склад зазвичай визначають на основі аналізу спектрів поглинання відповідної речовини. І це закономірно. Адже для того щоб отримати спектр випромінювання, досліджувану речовину потрібно нагріти до таких температур, при яких її структурний та молекулярний склад може кардинально змінюватись. Процедура сучасного спектрального аналізу достатньо проста. Від стандартного джерела суцільного спектру, направлений  світловий потік стандартних параметрів, проходить через шар досліджуваної речовини, та потрапляє на екран аналізуючого приладу. Цей, зазвичай комп’ютеризований прилад, практично миттєво аналізує отриману інформацію та формулює відповідні результати вимірювань.

**Словник фізичних термінів**

**Спектром** називають ту кольорову картинку, яку отримують шляхом розкладання світла спеціальним приладом (спектроскопом, спектрографом, спектрометром, тощо), а також ту сукупність довжин (частот) електромагнітних хвиль, яка відповідає цій картинці. За різними класифікаційними ознаками, спектри поділяються на дисперсійні та дифракційні, на спектри випромінювання та спектри поглинання, на спектри суцільні, лінійчаті та смугасті (складні лінійчасті).

**Спектральний аналіз**, це метод визначення хімічного складу речовини та інших її параметрів, на основі аналізу лінійчатого спектру цієї речовини.

**Контрольні запитання**

1.Чому суцільні спектри різних речовин є однаковими?

2. Чому лінійчаті спектри різних речовин є різними?

3. Чому спектр випромінювання газу високої густини є суцільним, а газу низької густини – лінійчатим?

4. Який спектр створює лампа денного світла? Чому?

5. Яке походження тих тонких темних ліній, що містяться в спектрі сонячного світла? Про що говорять ці лінії?

6. Який метод спектрального аналізу (аналіз спектрів випромінювання чи спектрів поглинання) є більш поширеним? Чому?

7. Опишіть процедуру сучасного спектрального аналізу.

8. Чому до 1868 року, хіміки не знали про існування гелію?

**§35. Шкала електромагнітних хвиль.**

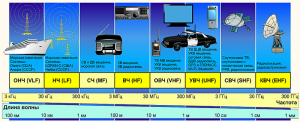
Не буде перебільшенням сказати, що увесь навколишній простір заповнений електромагнітними хвилями. Сонце і зірки, мобільні телефони і батареї опалення, полум’я свічки і дроти ліній електропередач, наша Земля і ми з вами, – все це, джерела електромагнітних хвиль, тобто певних коливань електромагнітного поля. Все різноманіття цих хвиль умовно розділяють на сім груп: 1 – низькочастотні електромагнітні хвилі; 2 – радіохвилі; 3 – інфрачервоне випромінювання; 4 – видиме світло; 5 – ультрафіолетове випромінювання; 6 – рентгенівське випромінювання; 7 – гама випромінювання. Гранично стисло характеризуючи кожну групу електромагнітних хвиль, можна сказати наступне.



Мал.135. Умовний поділ неперервного спектру електромагнітних хвиль на певні класифікаційні групи, прийнято називати шкалою електромагнітних хвиль.

**Низькочастотними електромагнітними хвилями** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких більші за 105м.  Дана різновидність хвиль є невід’ємним побічним продуктом тих змінних струмів які використовуються на виробництві, в побуті, на транспорті та інших сферах нашого цивілізованого життя. Скажімо, в дротах ліній електропередач протікає змінний струм, частота  якого 50Гц. А це означає, що даний струм неминуче породжує електромагнітні хвилі з довжиною λ=с/ν =6·106м. Такі хвилі мають надзвичайно низьку питому енергоємність, не викликають у нас жодних відчуттів, є абсолютно безпечними для організму людини і не мають жодного практичного застосування. Іншими словами, низькочастотні електромагнітні хвилі не є а ні шкідливими, а ні корисними.

**Радіохвилями**називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 105м до 10-4м і які застосовуються для передачі інформації в різноманітних системах радіозв’язку, радіолокації, радіонавігації, тощо. Про те як генеруються та як модулюються радіохвилі, як передаються та як фіксуються, ми говорили в процесі вивчення теми «Системи радіозв’язку». Тому на разі просто додамо, що діапазон застосувань радіохвиль надзвичайно широкий. При цьому хвилі різних довжин мають певні сфери переважного застосування. Загальні уявлення про ці сфери дає мал.136.



Мал.136. Сфери застосування різних діапазонів радіохвиль.

Зауважимо також, що радіохвилі, не викликають у людини певних відчуттів і не є шкідливими для її організму. Звичайно за умови, що концентрація цих хвиль не є надмірно високою. Адже якщо, наприклад, ви залізете на радіопередавальну антену потужного телецентру, то скоріш за все отримаєте серйозні опіки. Однак це зовсім не означає, що відповідні радіохвилі є смертельно небезпечними. Не станете ж ви, на підставі того що обпеклися нагрітою поверхнею праски, стверджувати, що ті електромагнітні хвилі які випромінює ця поверхня, є шкідливими. А між іншим, ці хвилі набагато енерго ємніші і якщо хочете, набагато шкідливіші за найшкідливіші з радіохвиль. Я вже не говорю про видиме світло, яке за такою логікою мало б бути просто смертельним.

**Інфрачервоним випромінюванням** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 2·10-3м до 7,6·10-7м. Зазвичай, основним джерелом інфрачервоного випромінювання є хаотичний (тепловий) рух атомів і молекул речовини. Однак, таке випромінювання створюється і в результаті тих процесів що відбуваються в енергетично збуджених атомах і молекулах. При цьому, результатом теплового (хаотичного) руху частинок речовини є суцільний спектр інфрачервоного випромінювання, а результатом тих процесів що відбуваються в енергетично збуджених атомах і молекулах – відповідний лінійчатий спектр.

Хвилі інфрачервоного випромінювання не лише створюються тепловим рухом частинок речовини, а й при взаємодії з речовиною, перетворюються на її тепловий рух. Іншими словами, при взаємодії з речовиною, інфрачервоне випромінювання змушує атоми та молекули речовини рухатись інтенсивніше. По суті це означає, що інфрачервоне випромінювання здатне викликати теплові відчуття.

Інфрачервоні електромагнітні хвилі випромінюють всі нагріті тіла, навіть ті, які прийнято вважати холодними. (Не будемо забувати, що тіло з температурою 0°С є фактично нагрітим до 273К). Надзвичайно потужним джерелом інфрачервоного випромінювання є Сонце. Адже майже 50% тієї енергії яку випромінює Сонце, є енергією інфрачервоних електромагнітних хвиль.

Інфрачервоне випромінювання має достатньо широке практичне застосування. Скажімо в побуті, інфрачервоне випромінювання є одним з основних джерел теплоти для наших помешкань. В науці, методами інфрачервоної спектроскопії визначають хімічний склад речовин та досліджують їх внутрішній устрій. В військовій справі, широко застосовують прилади нічного бачення, системи теплового самонаведення. В системах радіозв’язку, хвилі інфрачервоного спектру використовують в якості радіохвиль.

**Видимим світлом** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 7,6·10-7м до 3,8·10-7м і які викликають у людини зорові відчуття. Джерелом видимого світла є інтенсивний тепловий рух атомів, молекул та іонів речовини, а також ті внутрішні процеси які відбуваються в цих енергетично збуджених частинках. При цьому, результатом інтенсивного теплового руху частинок, є відповідний суцільний спектр видимого світла. А результатом тих внутрішніх процесів які відбуваються в цих частинках – відповідний лінійчатий спектр.

Видиме світло має ряд характерних властивостей, зокрема: викликає зорові відчуття; викликає теплові відчуття; є хімічно активним, тобто таким, що приймає активну участь в так званих фотохімічних реакціях.

Видиме світло займає мізерну частину загального спектру електромагнітних хвиль. Однак важливість цієї частини важко переоцінити. Бо видиме світло, це не просто та вузька щілина через яку ми дивимось на навколишній світ. Не просто невід’ємна та незбагненно важлива складова нашого повсякденного життя. Видиме світло, це енергетична основа самого життя. Адже основою того що ми називаємо життям, є складна фотохімічна реакція яка називається **фотосинтезом** і яка не можлива без фотонів видимого світла. Додайте до цього факт того, що добра половина тієї енергії яку отримує Земля від Сонця, є енергією видимого світла, і ви зрозумієте чому, вивченню такого простого об’єкту як видиме світло, присвячено такий величезний розділ фізики як “оптика”.

Після всього вище сказаного, навіть не зручно додавати, що видиме світло застосовується у всіх приладах геометричної оптики, хвильової оптики, квантової оптики та фотометрії. Що видиме світло, це основний інструмент наукового пізнання Природи. Що видиме світло, це основне джерело наших емоцій та творчих натхнень.

**Ультрафіолетовим випромінюванням** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від  3,8·10-7м до 10-9м. Джерелом ультрафіолетового випромінювання є особливо інтенсивний (t > 2000°С) тепловий рух атомів та іонів речовини, а також ті внутрішні процеси, що відбуваються в цих частинках при їх енергетичному збуджені. І як ви розумієте, результатом теплового руху частинок є суцільний спектр випромінювання, а результатом внутріатомних процесів – відповідний лінійчатий спектр.

Однією з характерних особливостей ультрафіолетового випромінювання, є його біологічна активність, тобто здатність активно впливати на певні біологічні процеси. І цей вплив може бути як корисним так і шкідливим. Скажімо, помірні дози довгохвильового ультрафіолетового випромінювання (λ > 250нм) позитивно впливають на організм людини, сприяють утворенню вітаміну D, підвищують загальний імунітет організму, тощо. В той же час, надмірні дози такого ж випромінювання, можуть мати негативні наслідки. Якщо ж мова йде про короткохвильову частину ультрафіолетового випромінювання (λ < 200нм), то воно майже безумовно шкідливе. Адже це випромінювання вбиває бактерії, а отже є таким що здатне руйнувати клітини більш складних організмів.

На щастя, атмосфера Землі практично не пропускає короткохвильовий ультрафіолет. Не пропускає головним чином тому, що в ній є достатньо велика кількість вільного кисню (О2) та похідного від нього озону (О3). До речі, факту наявності атмосферного кисню та озону, ми маємо завдячувати все тому ж видимому світлу та фотосинтезу.

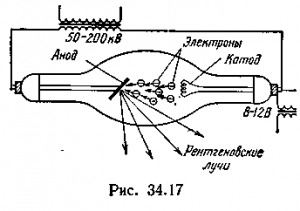
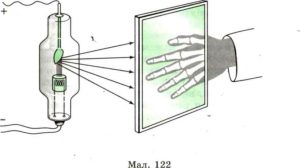
Штучними джерелами ультрафіолетового випромінювання, є спеціальні газорозрядні трубки, які зазвичай називають кварцовими лампами. (Корпусом цих ламп є спеціальне кварцове скло, яке є прозорим не лише для видимого світла а й для світла ультрафіолетового. До речі, звичайне віконне скло ультрафіолет практично не пропускає). Ультрафіолетові лампи широко застосовують в медичних закладах для дезінфекції приміщень. Подібні лампи використовують і в сучасній косметології.

В науці, методами ультрафіолетової спектроскопії досліджують внутрішній устрій речовин. В хімічному виробництві, за допомогою ультрафіолетового випромінювання здійснюють ряд важливих фотохімічних реакцій. Здатність ультрафіолету активізовувати люмінесцентні речовини, застосовується в лампах денного світла, в різноманітних світлових фарбах, в люмінесцентній дефектоскопії, тощо.

**Рентгенівським випромінюванням** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких знаходяться в межах від 10-8м до 10-12м. (Названо на честь німецького фізика Вільгельма Рентгена (1845-1923), який відкрив та дослідив це випромінювання). Джерелом рентгенівського випромінювання може бути над інтенсивний тепловий рух заряджених частинок речовини (t > 10000°С), а також ті процеси що відбуваються у внутрішніх шарах енергетично збуджених атомів. При цьому, те випромінювання яке утворюється в результаті над інтенсивного теплового руху частинок, створює суцільний спектр рентгенівського випромінювання. А те, яке утворюється в результаті певним чином упорядкованих внутріатомних процесів, створює відповідний лінійчатий спектр.

Потрібно зауважити, коли ми стверджували: “інфрачервоне, видиме та ультрафіолетове випромінювання, виникають в результаті тих процесів які відбуваються в енергетично збуджених атомах” – то мали на увазі енергетичне збудження валентних електронів, тобто електронів зовнішнього енергетичного шару атома. Рентгенівське ж випромінювання, виникає при енергетичному збуджені (перескакуванні на більш високі енергетичні рівні та поверненні з них) електронів внутрішніх шарів атома.

На практиці, рентгенівське випромінювання отримують за допомогою спеціальних приладів, які називаються рентгенівськими трубками (мал.137). Рентгенівська трубка представляє собою потужну вакуумну лампу з двома електродами (анод та катод) між якими створюється потужне електричне поле. Принцип дії цієї системи полягає в наступному. Електрони випромінюються розжареною спіраллю катода і під дією потужного електричного поля летять в напрямку анода, набуваючи при цьому надзвичайно великої швидкості. В момент удару об тіло катода, електрони різко гальмуються і випромінюють відповідні фотони рентгенівського світла.

мал.137.  Схема принципового устрою рентгенівської трубки.

Однією з характерних особливостей рентгенівського випромінювання є здатність проникати крізь оптично непрозорі тіла. Ця здатність широко застосовується в багатьох галузях сучасної науки, промисловості та медицини. Наприклад в медицині, методами рентгенодіагностики виявляють та досліджують механічні ушкодження кісток, наявність сторонніх предметів, пухлин, кровотеч, тощо. Методами рентгенотерапії борються з злоякісними пухлинами. Однак, потрібно мати на увазі, що рентгенівське випромінювання не є безпечним. А це означає, що його медичне застосування має бути обгрунтованим та поміркованим.

**Гама випромінюванням** називають ту частину загального спектру електромагнітних хвиль, довжини яких є меншими за 10-10м. Джерелом гама випромінювання може бути як неймовірно інтенсивний тепловий рух заряджених частинок речовини (t > 50000°С) так і ті процеси які відбуваються в енергетично збуджених атомних ядрах (збуджених в результаті ядерних реакцій, радіоактивного розпаду, тощо). І як ви вже здогадуєтесь, те гама випромінювання яке утворюється в результаті теплового руху частинок речовини, дає суцільний спектр. А те, яке утворюється в результаті певних внутріядерних процесів – відповідний лінійчатий спектр.

Гама випромінювання має надзвичайно велику проникливу здатність і є шкідливим для організму людини. Втім, як і практично завжди, ступінь цієї шкідливості чи не шкідливості залежить від інтенсивності потоку відповідного випромінювання. Скажімо, наше життя нерозривно пов’язане з наявністю певного природнього рівня радіації. І нема жодних свідчень того, що цей природній радіаційний фон є небезпечним для життя. До речі, рентгенівське та гама випромінювання відносять до числа так званих **іонізуючих випромінювань**, які в побутовій практиці називають страшним словом – **радіація**.

Гама випромінювання застосовується в ядерній спектроскопії, гама-дефектоскопії, променевій терапії, тощо. Гама випромінювання є одним поражаючих факторів зброї масового ураження.

Говорячи про різноманіття існуючих в природі електромагнітних хвиль, потрібно наголосити на тому, що ці хвилі утворюють неперервний, суцільний спектр, в якому електромагнітні хвилі якщо і відрізняються одна від одної, то лишу своєю довжиною (частотою коливань). І якщо цей неперервний спектр, ми ділимо на певні класифікаційні групи, то робимо це досить умовно. Ця умовність посилюється ще й фактом того, що одним з головних критеріїв класифікаційного поділу електромагнітних хвиль, є сфера їх практичного застосування. Тому коли, наприклад, електромагнітну хвилю випромінює ваш мобільний телефон, то її називають радіохвилею. Якщо ж точно така хвиля випромінюється батареєю системи опалення, то її називають інфрачервоним випромінюванням. Або якщо, скажімо, хвиля випромінюється рентгенівською трубкою, то її називають рентгенівським випромінюванням. А якщо аналогічна хвиля є результатом ядерної реакції, то її називають гама випромінюванням. Напевно єдиною групою електромагнітних хвиль, межі якої чітко визначені, є видиме світло. Втім, навіть ці межі є досить умовними.

З іншого боку, в неперервному спектрі електромагнітних хвиль, з усією очевидністю проявляється дія **закону переходу кількісних змін в якісні**. В цьому законі стверджується. ***Поступові кількісні зміни будь якого параметру об’єкту, рано чи пізно, плавно чи стрімко, призводять до появи значних, якісних змін властивостей цього об’єкту***. В нашому випадку об’єктом досліджень та змін є електромагнітна хвиля. А параметром який кількісно характеризує цей об’єкт – довжина хвилі. Аналізуючи реальні властивості електромагнітних хвиль, не важко помітити, що поступові і на перший погляд несуттєві кількісні зміни їх довжини, рано чи пізно призводять до таких якісних змін властивостей хвиль які дозволяють називати їх то радіохвилями, то інфрачервоним випромінюванням, то видимим світлом, то світлом червоним, то жовтим, а то фіолетовим.

Одним з проявів дії закону переходу кількісних змін в якісні, є факт того, що за певних довжин, електромагнітні хвилі набувають якісно нових властивостей – вони починають вести себе як певні неподільні частинки (корпускули, фотони, кванти). Скажімо, низькочастотні електромагнітні хвилі та радіохвилі квантових властивостей практично не проявляють. І це закономірно. Адже ці хвилі створюються по суті неперервними коливаннями величезної кількості заряджених частинок, джерелом яких є індукційні генератори, лампові чи напівпровідникові ГВЧ та інші їм подібні прилади. Якщо ж мова йде інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське та гама випромінювання, то вони є результатом певних дискретних подій, будь то різкі зміни швидкості при хаотичному русі частинок речовини, чи ті дискретні процеси які відбуваються в енергетично збуджених молекулах, атомах та атомних ядрах.

Експериментальні дослідження показують, що квантові властивості електромагнітних хвиль дійсно починають проявлятись на рівні інфрачервоного випромінювання. При цьому, по мірі зменшення довжини хвиль, їх квантові властивості стають все більш і більш відчутними, а хвильові, навпаки – все менш і менш помітними. Втім, про квантові властивості електромагнітних хвиль, зокрема світлових, ми поговоримо в наступній темі даного розділу.

**Контрольні запитання**

1.Як впливають на організм людини та які відчуття викликають: радіохвилі, інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське та гама випромінювання?

2. Які процеси призводять до створення інфрачервоного випромінювання? Які спектри утворюються в результаті цих процесів?

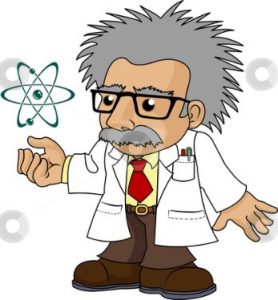
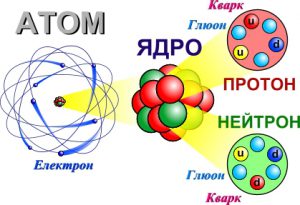
3. Які процеси призводять до створення ультрафіолетового випромінювання? Які спектри утворюються в результаті цих процесів?

4. Поясніть будову та принцип дії рентгенівської трубки.

5. Які процеси призводять до створення гама випромінювання? Які спектри утворюються в результаті цих процесів?

6. Що стверджується в законі переходу кількісних змін в якісні?

7. Як змінюються хвильові та квантові властивості електромагнітних хвиль, в процесі зменшення довжини цих хвиль?



**Постулати Бора:**

1.В атомі, електрони можуть знаходитись лише на певних, енергетично дозволених рівнях.

2. Перебуваючи на енергетично дозволеному рівні, електрон не випромінює світло.

***3. При поглинанні зовнішньої енергії, електрон переходить на більш високий енергетичний рівень, а при падінні з цього рівня – випромінює відповідний квант світлової енергії.***

Досліджуючи закономірності хімічних властивостей атомів, вчені з’ясували, що ці закономірності можна описати на основі чотирьох квантових величин, які прийнято називати **квантовими числами**:

1) головне квантове число n,

2) орбітальне квантове число l,

3) магнітне квантове число m,

4) спінове квантове число s.

**Головне квантове число** (позн. n), це таке ціле додатне число (n=1;2;3…) яке характеризує енергетичні параметри електрона і яке дорівнює порядковому номеру того енергетично дозволеного рівня на якому знаходиться даний електрон.

**Орбітальне квантове число**(позн. l), це таке ціле не від’ємне число (l=0;1;2;…) яке характеризує величину орбітального моменту імпульсу електрона. Для заданого енергетичного рівня (для заданого числа n) орбітальне квантове число може набувати всіх цілих значень від 0 до (n-1).

**Магнітне квантове число** (позн. m), це таке ціле число (m=0;±1;±2;…), яке характеризує просторову орієнтацію вектора орбітального моменту імпульсу електрона. Для заданого квантового числа l, магнітне квантове число може набувати всіх цілих значень з інтервалу ( -l; +l).

**Спінове квантове число** (позн. s), це таке напівціле число (s= ±1/2), яке характеризує величину та знак власного моменту імпульсу (спіну) електрона. Спінове квантове число може мати лише два значення: s = +1/2 ; s = -1/2 .

**Принцип Паулі** – це закон в якому стверджується: в атомі не може бути двох електронів з однаковим набором квантових чисел.

**Принцип мінімуму (принцип енергетичної доцільності)**, це закон, в якому стверджується: в атомі речовини, електрон завжди прагне зайняти таке місце, де кількість зосередженої в ньому енергії буде мінімально можливою.

Принцип Паулі та принцип мінімуму є тими базовими законами, які пояснюють порядок розташування електронів в атомі, а відповідно і періодичність його хімічних властивостей.

**Радіоактивність**, це явище, суть якого полягає в тому, що енергетично не стабільні атомні ядра, спонтанно випромінюючи певні мікрочастинки перетворюються на інші атомні ядра.

**Періодом напіврозпаду** радіоактивної речовини називають той проміжок часу, на протязі якого розпадається половина наявних атомів даної речовини.

В 1932 році, було запропоновано **протонно-нейтронну модель атомного ядра**. Згідно з цією моделлю, атомні ядра складаються з протонів та нейтронів. При цьому, кількість протонів дорівнює зарядовому числу ядра, а кількість нейтронів – різниці між масовим та зарядовим числом. Іншими словами: Np = Z;  Nn = M-Z. Наприклад, ядро урану 238U+92  складається з 92 протонів та 146 нейтронів.

**Ізотопами**називають такі різновидності хімічно однакових атомів, в ядрах яких міститься однакова кількість протонів але різна кількість нейтронів.

**Ядерні сили**, це такі сили, які діють в атомному ядрі і які обумовлені тим, що нуклони атомного ядра постійно обмінюються π-мезонами. Ядерні сили, це сили надзвичайно потужні, зарядово не залежні та короткодіючі. Ядерні сили є одним з проявів так званих **сильних взаємодій**.

**Нуклонами** називають ті протони та нейтрони які входять до складу атомного ядра. π**-мезонами (піонами)** називають ті елементарні частинки, які забезпечують міжнуклонні взаємодії та є носіями ядерних сил. π-мезони поділяються на π+, π– та π0 – мезони.

**Енергією зв’язку атомного ядра** називають ту мінімальну кількість енергії яку необхідно витратити на те щоб повністю розщепити дане атомне ядро на його складові нуклони

Позначається: ΔЕ

Визначальне рівняння: ΔЕ = Δmc2, де  Δm – дефект маси атомного ядра

Одиниця вимірювання: [ΔE] = Дж , (або еВ).

**Дефектом маси атомного ядра** називають ту різницю мас, що існує між загальною масою тих вільних нуклонів які утворюють дане атомне ядро (m2) та масою цього ядра (m1).

Позначається:  Δm

Визначальне рівняння: Δm = m2– m1

Одиниця вимірювання: [Δm] = кг.

**Електрон-вольт**, це позасистемна одиниця вимірювання енергії, яка дорівнює тій енергії яку отримує електрон (е=1,6·10-19Кл) при його переміщенні між двома точками електричного поля, напруга між якими один вольт: еВ=1,6·10-19Дж.

**Термоядерними реакціями (реакціями термоядерного синтезу)** називаються такі ядерні реакції, які відбуваються при надвисоких температурах (понад 106К) і в процесі яких, легкі атомні ядра об’єднуються у відповідні більш важкі ядра.

**Альфа-розпадом** називають таке спонтанне радіоактивне перетворення атомного ядра, яке є результатом випромінюванням α-частинки (4α+2).

**Бета-розпадом** називають таке спонтанне радіоактивне перетворення атомного ядра, яке є результатом випромінюванням β-частинки (0β-1).

**Нейтронним розпадом** називають таке спонтанне радіоактивне перетворення атомного ядра, яке є результатом випромінювання нейтрона.

**Тунельний ефект**, це явище, суть якого полягає в тому, що з певною ймовірністю складова мікрочастинка квантової системи (наприклад атомного ядра), може вийти за межі цієї системи навіть в тому випадку, коли енергія частинки значно менша за висоту потенціального бар’єру системи.

**Висотою потенціального бар’єру квантової системи** називають ту мінімальну кількість енергії, яка згідно з законами класичної фізики, забезпечує вихід даної мікрочастинки за межі відповідної системи.

**Радіоактивною родиною (радіоактивним рядом)** називають таку послідовність взаємопов’язаних радіоактивних атомів, в якій кожний наступний атом утворюється в результаті альфа або бета розпаду попереднього атома.

**Ядерними реакціями поділу** називають такі ядерні реакції при яких надмасивні атомні ядра в процесі взаємодії з сторонніми нейтронами, діляться на дві приблизно рівні частини та декілька нових нейтронів.

**Ланцюговими ядерними реакціями** називають такі само відновлювальні ядерні реакції поділу, продукти яких спричиняють нові цикли аналогічних реакцій.

**Коефіцієнт розмноження нейтронів**, це величина яка характеризує ланцюгову ядерну реакцію поділу і яка дорівнює відношенню числа результативно прореагувавших нейтронів на даному етапі ланцюгової реакції (Ni) до їх числа на попередньому етапі цієї реакції (Ni-1):  k = Ni/Ni-1 .

**Атомна (ядерна) бомба**, це прилад в якому енергія неконтрольованих ядерних реакцій поділу вибухоподібно перетворюється в енергію ударної хвилі, світлового випромінювання та проникаючої радіації.

**Ядерний реактор**, це прилад, в якому енергія контрольованих ланцюгових ядерних реакцій поділу, дозовано претворюється в теплову енергію, яка за необхідності перетворюється в механічну роботу та енергію електричного струму.

**Іонізуючим випромінюванням (радіацією)** називають потік таких енергійних частинок які здатні іонізувати молекули повітря.

**Коефіцієнтом відносної біологічної ефективності випромінювання** називають ту величину, яка показує у скільки разів біологічна дія даного виду радіації більша за біологічну дію аналогічної за енергією кількості гама-випромінювання (позначається k)

**Поглинутою дозою випромінювання**називають ту кількість енергії іонізуючого випромінювання що поглинається одиницею маси даного тіла.

Позначається: D

Визначальне рівняння: D = E/m

Одиниця вимірювання: [D] = Дж/кг = Гр , грей.

**Еквівалентною дозою випромінювання** називають ту величину яка дорівнює добутку поглинутої дози випромінювання на коефіцієнт біологічної ефективності цього випромінювання.

Позначається: De

Визначальне рівняння:  De = kD

Одиниця вимірювання: [De] = Дж/кг = Зв ,    зіверт.

**Елементарна частинка** – це такий мікрооб’єкт, який представляє собою певний неподільний згусток мас-енергії, що має певні корпускулярно-хвильові властивості, характеризується певним набором фізичних величин і за певних умов може перетворюватись в інші елементарні частинки та навпаки – виникати з них.

**Анігіляція** – це такий квантовий процес, при якому елементарна частинка та її античастинка перетворюються на кванти відповідного поля. По суті, в процесі анігіляції та прихована енергія яку називають масою спокою частинки, трансформується в ту явну енергію, яку називають енергією руху (чистою енергією, кінетичною енергією).

**Гравітаційні взаємодії** – це такий вид матеріального зв’язку, який існує між тими об’єктами що мають масу і носієм якого є гравітаційне поле та його неподільні кванти які називаються гравітонами.

**Гравітон** – це елементарна частинка, яка є неподільним квантом гравітаційного поля та носієм гравітаційних взаємодій (позначається 0g0 : τ=∞: m0=0; q=0; s=2ћ).

**Електромагнітні взаємодії** – це такий вид матеріального зв’язку, який існує між тими об’єктами що мають електричний заряд або магнітний момент і носієм якого є електромагнітне поле та його неподільні кванти які називаються фотонами.

**Фотон** – це елементарна частинка яка є неподільним квантом електромагнітного поля та носієм електромагнітних взаємодій (позначається 0γ0 : τ=∞; m0=0; q=0; s=1ћ).

**Сильні взаємодії** – це такий вид матеріального короткодіючого зв’язку який виникає між важкими елементарними частинками (адронами) і носієм якого, за сучасними уявленнями, є глюонне поле та його неподільні кванти які називаються глюонами.

**Слабкі взаємодії** – це такий вид матеріального короткодіючого зв’язку, який обумовлений тими процесами що відбуваються всередині елементарних частинок і який призводить до взаємоперетворення цих частинок.

**ОПТИКА**



**Оптика**(від грец. optos – видимий), це розділ фізики в якому вивчається все різноманіття тих явищ які пов’язані з випромінюванням, розповсюджуванням та різноманітними проявами світла. Іншими словами, оптика – це наука про світло.

Природа влаштована таким дивним чином, що її найпростіші об’єкти є найскладнішими. Найскладнішими в тому сенсі, що надзвичайно складно, а іноді й просто неможливо, наочно пояснити на що схожі ці об’єкти. Одним з таких елементарно простих і в той же час надскладних об’єктів є світло.

Вже факт того, що вивченню властивостей та проявів світла присвячено один з найбільших розділів сучасної фізики, безумовно вказує на важливість та складність цього об’єкту. На цю складність вказує і те, що в різних розділах оптики, на запитання “що таке світло?” відповідають по різному. Наприклад, в геометричній оптиці стверджується, що **світло – це потік світлових променів.** В фотометрії, говориться про те, що **світло – це потік світлової енергії**. В хвильовій оптиці доводиться, що **світло – це потік світлових хвиль**. А в квантовій оптиці, що **світло – це потік світлових частинок**.

**Тема 5.1.  Геометрична оптика.**

**Геометрична оптика** – це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлових променів і в якому вивчають ті явища які пояснюються виходячи з того, що світло це потік променів. **Світловий промінь** (промінь) – це умовна лінія, яка вказує на напрям розповсюдження тієї світлової енергії що випромінюється певним джерелом світла.

**Джерелом світла** (в геометричній оптиці) називають будь який об’єкт що є джерелом генерованого або відбитого світла.

**Оптично прозорим** називають таке середовище, в якому процес розповсюдження світла не супроводжується значним перетворенням світлової енергії в енергію теплового руху частинок середовища.

**Оптично не прозорим** називають таке середовище, яке повністю поглинає ту світлову енергію що потрапляє в це середовище, або повністю відбиває цю енергію.

**Оптично рівною** називають таку поверхню, розміри мікронерівностей якої не перевищують довжини світлової хвилі. Зазвачай оптично рівні відбивні поверхні називають **дзеркальними**.

**Оптично не рівною** називають таку поверхню, розміри мікронерівностей якої суттєво більші за довжину світлової хвилі. Зазвичай, оптично не рівні відбивні поверхні називають **дифузійними** або **розсіювальними**.

**Закон прямолінійності розповсюдження світла** – це закон, в якому стверджується: в оптично однорідному середовищі, світлові промені розповсюджуються прямолінійно.

**Оптично однорідним**, називають таке оптично прозоре середовище, оптичні властивості якого в усіх точках  одлнакові.

**Закон відбивання світла** – це закон, в якому стверджується: на межі двох оптично різних середовищ світлові промені відбиваються, при цьому: 1) проміннь падаючий, промінь відбитий і перпендикуляр до поверхні в точці падіння променя, лежать в одній площині; 2) кут відбивання променя (β) дорівнює куту його подіння (α): ∠β = ∠α.

**Закон заломлення світла** – це закон, в якому стверджується: на межі двох оптично різних та оптично прозорих середовищ, світлові промені заломлюються, тобто проникаючи в нове середовище змінюють напрям свого розповсюдження. При цьому: 1) промінь падаючий, промінь заломлений та перпиндикуляр до поверхні в точці падіння променя, лежать в одній площині; 2) відношення синуса кута падіння променя (sinα) до синусу кута його заломлення (sinγ) для даної пари середовищ є постійною величиною: sinα/sinγ = n12, де n12 – **показник заломлення світла** першого середовища відносно другого.

**Абсолютний показник заломлення світла**, це фізична величина, яка характеризує оптичні властивості даного оптично прозорого середовища і яка з одного боку дорівнює відношенню синусу кута падіння променя до синусу кута його заломлення (sinα/sinγ), а з іншого – показує, у скільки разів швидкість світла в даному середовищі (v) менша за швидкість світла в вакуумі (с=3·108м/с).

Позначається: n

Визначальне рівняння:   n =sinα/sinγ=c/v

Одиниця вимірювання: [n] = – ,  безрозмірна величина (рази).

Порівнюючи оптичні властивості двох прозорих середовищ говорять, що те з них яке має більше значення абсолютного показника заломлення є **оптично більш густим**, а те, яке має менше значення абсолютного показника заломлення – **оптично менш густим**. Наприклад скло (n=1,52) оптично густіше за воду (n=1,33), а алмаз (n=2,42) оптично густіший за скло.

**Дзеркало** – це оптичний прилад, який представляє собою оптично рівну, відбивну (дзеркальну) поверхню, що має певну, геометрично правильну форму. Цією геометрично правильною формою  може бути фрагмент площини (**плоске дззеркало**), або частина сфери, циліндра, тора, еліпсоїда, параболоїда, тощо (**криве дзеркало)**.

**Уявним**, називають таке зображення яке є результатом уявного перетинання відбитих або заломлених променів.

**Дійсним**, називають таке зображення яке є результатом дійсного перетинання відбитих або заломлених променів.

**Фокусом дзеркала** (головним фокусом дзеркала) називають ту точку в якій дійсно або уявно перетинаються ті відбиті промені, які до відбивання були паралельними головній оптичній осі дзеркала.

**Повне відбивання світла**, це явище, суть якого полягає в тому, що при певних кутах падіння (α ≥ αгр) те світло яке розповсюджується в оптично більш густому середовищі, повністю відбивається від межі з оптично менш густим середовищем. Той найменший кут падіння при якоку відбувається повне відбивання світла, називають **граничним кутом повного відбивання** (позначається αгр).

**Оптичними волокнами** називають тонкі оптично прозорі волокна, які дозволяють передавати світлові потоки та світлову інформацію криволінійними траєкторіями.

**Оптична призма**, це прилад, який представляє собою оптично прозоре тіло, робочі поверхні якого геометрично та оптично рівні.

**Лінза (оптична лінза)**, це прилад, який представляє собою оптично прозоре тіло обмежене двома оптично рівними криволінійними або криволінійною та плоскою, поверхнями і який визначеним чином формує відповідне оптичне зображеня.

**Збиральними (опуклими)** називають такі лінзи, які будучи розташованими в оптично менш густому серидовищі, збирають початково паралельні промені в околицях певної точки, яку називають фокусом лінзи.

**Розсіювальними (вгнутими)** називають такі лінзи, які будучи розташованими в оптично менш густому середовищі, розсіюють початково паралельні промені, причому розсіюють таким чином, що їх уявні продовження перетинаються в околицях певної точки, яку називають фокусом розсіювальної лінзи.

**Фокусом (головним фокусом) лінзи**, називають ту точку, в якій дійсно або уявно перетинаються ті заломлені лінзою промені, які до проходження через лінзу були паралельними її головній оптичній осі. Відстань від фокусу лінзи до її оптичного центру називають **фокусною відстанню лінзи** (позн. ƒ).

**Оптична сила лінзи**, це фізична величина, яка характеризує заломлювальні властивості опричної лінзи і яка обернена до її фокусної відстані.

Позначається:  D

Визначальне рівняння:  D = 1/ƒ

Одиниця вимірювання:  [D] = 1/м = дп ,   діоптрія.

**Мікроскоп**, це прилад, призначений для візуального спостереження за тими мікрооб’єктами, що є невидимими для “неозброєного” ока людини.

**Телескоп**, це прилад, призначений для візуального спостереження за далекими космічними об’єктами.

**Бінокль**, це прилад складений з двох паралельно з’єднаних зорових труб та призначений для візуального спостереження за віддаленими земними об’єктами.

**Фотооб’єктив**, це оптичний прилад, який є складовою частиною іншого, більш складного приладу і який призначений для того, щоб максимально чітко сфокусувати зображення об’єкту фотографування на світлочутливий елемент основного приладу.

**Тема 5.2.  Фотометрія.**

**Фотометрія**, це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлової енергії і в якому вивчають енергетичні параметри світлових потоків та методи їх вимірювання.

**Світловий потік** – це фотометрична величина, яка характеризує світлову потужність джерела світла і яка показує скільки світлової енергії (Q) випромінює дане джерело за одиницю часу, за умови, що величина цієї енергії визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається:  Ф

Визначальне рівняння:  Ф = Q/t

Одиниця вимірювання:  [Ф] = лм,  (люмен).

**Сила світла** – це фізична величина, яка характеризує той світловий потік що розповсюджується в певному напрямку і яка дорівнює відношенню того світлового потоку ΔФ, що розповсюджується в межах певного об’ємного кута ΔΩ, до величини цього кута.

Позначається:  J

Визначальне рівняння: J = ΔФ/ΔΩ,

Одиниця вимірювання: [J] = кд,  (кандела).

**Кандела**, це одиниця вимірювання сили світла, яка дорівнює силі світла такого джерела, що випромінює монохроматичне світло з довжиною хвилі 555нм при силі випромінювання в даному напрямку (1/683)Вт/ср.

**Об’ємний (тілесний) кут**, це фізична величина, яка характеризує кутові параметри тієї частини простору що обмежена конічною поверхнею, вершина якої співпадає з вершиною відповідного об’ємного кута, і яка дорівнює відношенню площі (ΔS) тієї частини сфери що обмежена відповідним кутовим конусом, до квадрату радіусу цієї сфери (R2).

Позначається: Ω  (омега)

Визначальне рівняння: Ω = ΔS/R2

Одиниця вимірювання:  [Ω] = ср,   (стерадіан).

**Стерадіан** (від грец. stereos – об’єм та лат.  radius – промінь, радіус), це одиниця вимірювання об’ємних кутів, яка чисельно дорівнює такому центральному об’ємному куту, який будучи проведеним з центру сфери радіусом R обмежує на її поверхні площу величиною R2.

**Освітленість** – це фотометрична величина, яка характеризує ту кількість світлового потоку що потрапляє на одиницю площі поверхні і величина якої визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається: Е

Визначальне рівняння:  Е = ΔФ/ΔS

Одиниця вимірювання:  [Е] = лм/м2 =лк, (люкс).

**Узагальнений закон освітленості** – це закон, в якому стверджується: та освітленість яку створює точкове джерело світла на будь якому малому фрагменті поверхні, визначається за формулою  E = Jcosα/l2,

де  J – сила світла даного точкового джерела світла;

l – відстань від джерела світла до даного фрагменту поверхні;

α – кут падіння променів на відповідний фрагмент поверхні.

**Тема 5.3.   Хвильова оптика.**

**Хвильова оптика**, це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлових (електромагнітних) хвиль і в якому вивчають та пояснюють ті явища, що підтверджують цей факт.

**Видиме світло** – це потік електромагнітних хвиль, які викликають у людини зорові відчуття і довжини яких знаходяться в межах від 380нм до 760нм. При цьому кожній довжині хвилі видимого світла відповідає певний колір зорових відчуттів людини. Спектр цих кольорів умовно розділяють на сім основних кольорів: червоний, оранжевий, жовтий, зелений, голубий, синій, фіолетовий. Зазвичай, видиме світло є результатом інтенсивного теплового руху заряджених частинок, або тих процесів які відбуваються в енергетично збуджених атомах та молекулах.

**Принцип суперпозиції хвиль**, це закон в якому стверджується: хвилі розповсюджуються незалежно одна від одної, тобто таким чином що при їх взаємодії, індивідуальні властивості та параметри кожної хвилі зберігаються. При цьому, результуюча дія системи багатьох хвиль, визначається як сума відповідних дій кожної окремої хвилі.

**Інтерференція хвиль** – це явище, суть якого полягає в тому, що при накладанні когерентних хвиль, спостерігається стійка хвильова картинка в якій підсилення хвиль в одних місцях, певним чином чергується з їх послабленням в інших місцях.

**Когерентними** (узгодженими) називають такі хвилі, які мають однакові параметри періодичності (Т, ν, λ), однакову площину коливань та незмінну різницю фаз.

**Монохроматичним** (від грец. monos – один та chroma – колір) називають таке світло, яке складається з електромагнітних хвиль певної, строго визначеної довжини хвилі (певного кольору).

**Інтерферометр** це прилад, який з надзвичайно високою точністю вимірює довжину і принцип дії якого базується на кількісному аналізі тієї інтерференційної картинки яка певним чином пов’язана з предметом вимірювань.

**Дифракція хвиль**, це явище, суть якого полягає в тому, що в процесі свого розповсюдження хвилі заходять в область геометричної тіні тієї перешкоди що зустрічається на їх шляху (огинають перешкоди).

**Дифракційна решітка**, це прилад, який дозволяє отримувати потоки когерентних світлових хвиль і який представляє собою систему періодично розташованих паралельних, надзвичайно вузьких прозорих та непрозорих, або дзеркальних та дифузійних смужок. В світловому потоці, дифракційна решітка стає джерелом великої кількості когерентних світлових хвиль, які в процесі інтерференції створюють відповідну інтерференційну картинку. Аналіз цієї картинки дозволяє вирішувати багато практично важливих задач, зокрема визначати довжину світлової хвилі.

Явища  інтерференції та дифракції доводять, що світло  це потік хвиль. Однак ці явища жодним чином не вказують на те, які це хвилі – поздовжні чи поперечні. Одним з тих явищ, яке безумовно вказує на поперечність світлових хвиль є так звана поляризація світла.

**Поляризація світла**– це  явище, суть якого полягає в тому, що  при проходженні неполяризованого світла через деякі оптично прозорі кристали, зокрема кристали турмаліну, це світло стає поляризованим, тобто таким в якому коливання векторів  **Е** і **В** відбуваються в строго визначених площинах.

**Неполяризованим (природнім) світлом** називають таке світло, в якому коливання векторів **Е**і **В**  відбуваються у всіх можливих площинах.

**Поляризованим світлом** називають таке світло, в якому коливання векторів **Е** і **В** відбуваються в певній, строго визначеній площині.

**Площиною поляризації кристалу** називають ту умовну площину, яка співпадає з площиною коливань вектора **Е**  того поляризованого світла, яке створює цей кристал. **Поляризаторами**називають ті прилади, які неполяризоване світло перетворюють на світло поляризоване.

Дослідження показують, що на межі двох оптично різних та оптично прозорих середовищ, світлові хвилі різних довжин (різних кольорів) заломлюються суттєво по різному. Це означає, що показник заломлення світла залежить не лише від оптичних властивостей відповідного середовища, а й від довжини хвилі того світла, що заломлюється. Цю залежність та пов’язану з нею сукупність оптичних явищ називають дисперсією світла.

**Дисперсією світла** називають сукупність тих оптичних явищ, які обумовлені залежністю абсолютного показника  заломлення світла від довжини хвилі цього світла. Результатом дисперсії є факт того, що в процесі заломлення біле світло розкладається на його складові кольори. Ту картинку, яку отримують в результаті прогнозованого розкладання світла на його  складові кольори називають **спектром світла**. Прилад, який дозволяє отримувати якісні спектри називають **спектроскопом**.

За способом отримання спектральної картинки, спектри поділяються на дисперсійні та дифракційні.   **Дисперсійний спектр** –  це такий спектр, який отримують за допомого дисперсійного (призматичного)  спектроскопу. **Дифракційний спектр –** це такий спектр який отримують за допомого дифракційного спектроскопу.

За енергетичними параметрами того світла, яке дає відповідний спектр, спектри поділяються на спектри випромінювання  та спектри поглинання. **Спектром випромінювання** називають такий спектр, який характеризує параметри того світла, що  випромінюється відповідним об’єктом.**Спектром  поглинання** називають такий спектр, який характеризує параметри того світла, що поглинається відповідним об’єктом.

За загальним виглядом спектральної картинки, а отже і за частотним складом тих електромагнітних хвиль, які утворюють цю картинку, спектри поділяються на суцільні, лінійчаті та смугасті (складні лінійчаті).

**Суцільним спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою суцільну спектральну картинку яка складається з усіх спектральних кольорів видимого світла і якій відповідає повний набір електормагнітних хвиль з діапазону від 380нм до 760нм. Суцільний спектр є результатом інтенсивного теплового (хаотичного) руху частинок речовини.

**Лінійчатим спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою певний набір тонких спектральних ліній. Лінійчаті спектри дають системи обособлених енергетично збуджених атомів, зокрема розріджені пари та гази атомарного складу. При цьому, кожна різновидність атомів, дає свій неповторний лінійчатий спектр. Даний факт пояснюється тим, що лінійчатий спектр є відображенням тих процесів які відбуваються в енергетично збудженому атомі.

**Смугастим спектром випромінювання** називають такий спектр, який представляє собою певний набір відносно широких спектральних смужок, кожна з яких в свою чегу, складається з великої кількості тонких, близько розташованих спектральних ліній. Іншими словами, смугастий спектр – це складна різновидність лінійчатого спектру. Смугасті спектри дають системи обособлених, енергетично збуджених молекул, зокрема розріджені газа молекулярного складу. При цьому, кожна різновидність молекул дає свій неповторний смугастий (складний лінійчатий) спектр.

Дослідження показують, що спектри випромінювання та спектри поглинання однієї і тієї ж речовини є абсолютно симетричними. Це означає, що коли, будучи нагрітою, речовина випромінює певний набір електромагнітних хвиль, то в холодному стані ця речовина поглинає точно такий же набір хвиль.

Факт того, що речовина має свій неповторний спектральний відбиток, лежить в основі так званого спектрального аналізу. **Спектральний аналіз** – це метод визначення хімічного складу речовини на основі аналізу її лінійчатих та  смугастих спектрів випромінювання або поглинання.

**Веселка (райдуга)** – це атмосферне оптичне явище, суть якого полягає в тому, що сонячне світло заломлюючись та відбиваючись в краплинках неперервного потоку дощу, дисперсійно розкладається на його складові кольори і утворює відповідну кольорову дугу.

**Тема 5.4    Квантова оптика.**

**Квантова оптика**, це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлових частинок (**фотонів**), та вивчають ті явища які підтверджують цей факт.

**Абсолютно чорне тіло** – це таке умовне, ідеалізоване тіло, яке в залежності від ситуації, можна вважати як таким, що поглинає увесь спектр електромагнітних хвиль, так і таким, що випромінює аналогічний спектр.

**Закон Стефана-Больцмана** – це закон, в якому стверджується: інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла (R), пропорційна четвертій степені його абсолютної температури (T), тобто  R = σT4,  де  σ = 5,67·10-7(Вт/м2К4) – постійна величина, яка називається **сталою Стефана-Больцмана**.

**Закон Віна** – це закон, в якому стверджується: максимальне значення спектральної інтенсивності випромінювання (rм) абсолютно чорного тіла, припадає на ті хвилі, довжина яких (λм) визначається за формулою λм = b/T, де Т – абсолютна температура тіла;  b=2,90·10-3м·К – постійна величина яка називається **сталою Віна**.

**Інтенсивність випромінювання** – це фізична величина, яка характеризує питому потужність джерела електромагнітного випромінювання і яка показує скільки електромагнітної енергії випромінюється одиницею площі поверхні даного джерела за одиницю часу.

Позначається:  R

Визначальне рівняння:   R = ΔE/SΔt

Одиниця вимірювання:  [R] = Вт/м2 .

**Спектральна інтенсивність випромінювання** – це фізична величина, яка характеризує величину тієї інтенсивності випромінювання, що припадає на певний інтервал довжин хвиль (Δλ)

Позначається:  r

Визначальне рівняння:  r = ΔR/Δλ

Одиниця вимірювання:  [r] = Вт/м3.

**Стала Планка** – це фундаментальна фізична стала, що є визначальною для широкого кола тих явищ в яких проявляються квантові властивості матерії. За сучасними даними h=6,626176·10-34Дж·с.

**Фотон**, це елементарна частинка, яка представляє собою неподільний квант електромагнітного випромінювання, з наступним набором властивостей

1.Фотон – частинка не заряджена (q=0) з нулевою масою спокою (m0=0).

2.  За будь яких обставин і в будь якому середовищі, фотони рухаються з швидкістю с=3,0·108м/с=const.

3. Фотон має енергію, величина якої визначається за формулою Е = hc/λ,

де  h=6,63·10-34Дж·с – стала Планка;  с=3·108м/с – швидкість фотона;  λ – довжина хвилі фотона.

4. Фотон має масу, величина якої визначається за формулою m=E/c2=h/cλ.

5. Фотон має імпульс, величина якого визначається за формулою р=mc=h/λ.

**Зовнішній фотоефект (фотоефект)** – це явище, суть якого полягає в тому, що при взаємодії світла з речовиною (зазвичай з металами), енергія фотонів дискретним чином передається електронам речовини. При цьому відповідні електрони вилітають за межі речовини.

**Рівнянням Ейнштейна для фотоефекту**, це закон в якому стверджується: при зовнішньому фотоефекті, енергія фотона частково йде на виконання роботи виходу електрона, а частково – на надання цьому електрону певної кінетичної енергії, при цьому виконується співвідношення

hc/λ = Aв + mevм2/2.

**Червоною межею фотоефекту** (позн λгр) називають ту гранично велику довжину хвилі, при якій ще відбувається зовнішній фотоефект і при якій виконується співвідношення hc/λгр=Ав.

**Внутрішній фотоефект**, це явище, суть якого полягає в тому що при взаємодії світла з речовиною (зазвичай з напівпровідниками), енергія фотонів дискретним чином передається електронам речовини. При цьому відповідні електрони відриваються від своїх атомів, але не вилітають за межі речовини.

**Фотоіонізація газу**, це явище, суть якого полягає в тому, що при взаємодії світла з обособленими молекулами (атомами) газу, енергія фотонів дискретним чином передається електронам цих молекул. При цьому молекули газу іонізуються.

**Фотохімічними реакціями** називають такі хімічні реакції, які відбуваються за активної участі видимого або ультрафіолетового світла.

**Закон фотохімічної еквівалентності**, це закон, в якому стверджується: поглинання одного світлового фотона спричиняє один акт первинної фотохімічної реакції.

**Фотосинтез**, це сукупність складних фотохімічних процесів які відбуваються в клітинах рослин та фотосинтезуючих бактерій. Узагальнюючий результат цих процесів, можна представити у вигляді наступної формули:    6Н2О + 6СО2 + n(hc/λ) → C6H12O6 + 6O2.

**Люмінесценція**, це таке випромінювання, яке відбувається за рахунок будь якого виду енергії окрім теплової і яке не є результатом відбивання, заломлення чи розсіювання іншого світла. Люмінесцентне випромінювання характеризується трьома визначальними ознаками: 1)це випромінювання не є тепловим; 2) це випромінювання має певне післясвітіння; 3) це випромінювання має лінійчатий спектр. В залежності від виду тієї енергії, яка перетворюється в енергію люмінесцентного випромінювання (Елюм)  виділяють наступні різновидності люмінесценції :

– фотолюмінесценція    ( Есв → Елюм)

– радіолюмінесценція    ( Ерад→ Елюм)

– електролюмінісценція ( Еел→ Елюм)

– хемілюмінесценція      (Ехім→ Елюм)

– біолюмінесценція        (Ебіо→ Елюм)

– триболюмінесценція    (Емех→ Елюм)

**Оптичний квантовий генератор (лазер)**, це прилад, який представляє собою джерело монохроматичного, когерентного, поляризованого, вузько направленого електромагнітного випромінювання (світла) з високою концентрацією енергії в ньому.

**Ефект Компотна –** це явище суть якого полягає в тому, що при взаємодії з вільними або слабко зв’язаними електронами речовини, фотони рентгенівського та гамма випромінювання ведуть  себе як пружні кульки, які  при взаємодії з електронами втрачають частину своєї енергії, а відповідно змінюють довжину своєї хвилі.

**Тиск світла** – це явище, суть якого полягає в тому, що світловий потік створює певний механічний тиск на ті об’єкти які зустрічаються на його шляху.

***Тема 5.2. Фотометрія.***

§25. Основні фотометричні величини та одиниці їх вимірювання.          152

§26. Освітленість. Закони освітленості.                                                             157

**Тема 5.2.   Фотометрія.**

**Фотометрія**, це розділ оптики, в якому світло представляють як потік світлової енергії і в якому вивчають енергетичні параметри світлових потоків та методи їх вимірювання.

**§25. Про основні фотометричні величини та одиниці їх вимірювання.**

Малоприємна особливість фотометрії полягає в тому, що в ній, енергетичні параметри світла визначають за суб’єктивними зоровими відчуттями людини. А ці відчуття такі, що світло різних кольорів (різних довжин хвиль), людина сприймає суттєво по різному. По різному в тому сенсі, що однакові за енергетичною потужністю, але різні за кольором світлові потоки, людина сприймає як такі що мають різну світлову інтенсивність (різну світлову потужність). Наприклад, якщо об’єктивні прилади показують, що червона, жовта та синя лампочки випромінюють однакову кількість світлової енергії (мають однакову потужність), то людина з нормальним зором скаже, що світлова потужність жовтої лампочки приблизно в п’ять разів більша аніж в червоної і в десять разів більша аніж в синьої.

Факт того, що в фотометрії енергетичні параметри світла оцінюють за зоровими відчуттями людини, по суті означає, що відповідні фізичні величини є суб’єктивними, тобто такими, числові значення яких залежать від особливостей людських відчуттів. Зважаючи на ці обставини, фізичні величини світлової фотометрії ми будемо називати не фізичними, а фотометричними. Втім, вище сказане зовсім не означає, що в фотометрії не застосовують певних об’єктивних вимірювальних приладів. Просто ці прилади налаштовують таким чином, щоб їх показання максимально точно відповідали зоровим відчуттям людини, а точніше – відчуттям **усередненого світлоадаптованого ока людини.**

Потрібно зауважити, що в сучасній науці фактично існує два розділи фотометрії: **світлова фотометрія**та **енергетична фотометрія**. При цьому, в світловій фотометрії енергетичні параметри світла визначають за суб’єктивними зоровими відчуттями людини, а в енергетичній фотометрії – за об’єктивними показаннями загально прийнятих енерговимірювальних приладів. Та як би там не було, а в побутовій практиці, параметри світлових потоків ми оцінюємо за нашими зоровими відчуттями. Зважаючи на ці та деякі інші обставини, в межах програми загальноосвітньої школи вивчають основи тієї фотометрії яка називається світловою, і в якій енергетичні параметри світла оцінюють за зоровими відчуттями людини.

До числа основних фотометричних величин відносяться: світловий потік (Ф), сила світла (J), та освітленість (Е).

**Світловий потік** – це фотометрична величина, яка характеризує світлову потужність джерела світла і яка показує скільки світлової енергії (Q) випромінює дане джерело за одиницю часу, за умови, що величина цієї енергії визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається:  Ф

Визначальне рівняння:  Ф = Q/t

Одиниця вимірювання:  [Ф] = лм ,  (люмен, від лат. lumen – світло).

**Сила світла** – це фізична величина, яка характеризує той світловий потік що розповсюджується в певному напрямку і яка дорівнює відношенню того світлового потоку ΔФ, що розповсюджується в межах певного об’ємного кута ΔΩ, до величини цього кута.

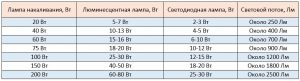
Позначається:  J

Визначальне рівняння: J = ΔФ/ΔΩ,

Одиниця вимірювання: [J] = кд,  (кандела, від лат. candela – свічка).

Зазвичай основними характеристиками побутових джерел світла є та, виміряна в джоулях, енергетична потужність яку споживає дане джерело світла, та виміряна в люменах величина того світлового потоку, що випромінюється цим джерелом. На мал.91 представлені найбільш поширені побутові джерела світла (лампа розжарювання, люмінесцентна лампа і лампа світлодіодна) та їх основні енергетичні характеристики.





Мал.91. Побутові джерела світла та їх основні енергетичні характеристики.

Не важко бачити, що одиниці вимірювань фотометричних величин (лм, кд, лм·с), які фактично характеризують енергетичні параметри світла,  практично не пов’язані з іншими, аналогічними та загально прийнятими одиницями (Дж, Вт, Вт/ср). По суті, мова йде про автономну систему одиниць, в якій основним вимірювальним приладом є **усереднене світлоадаптоване око людини**, а основною одиницею – **кандела**.

Чому кандела? А тому, що наше око фактично сприймає не ту загальну світлову енергію (Q) і не той загальний світловий потік (Ф) що випромінюється даним джерелом світла, а ту частину світлового потоку що розповсюджується в напрямку ока. Іншими словами, той вимірювальний прилад який називається усередненим світлоадаптованим оком людини, фактично реагує на ту величину яка називається силою світла (J). Зважаючи на ці обставини, в якості основної одиниці вимірювань фотометричних величин, обрано одиницю сили світла – канделу.

В різний час, кандела (стара назва “свічка”, пізніше – “міжнародна свічка”) визначалась по різному. Достатньо сказати, що в різний час, еталонами цієї одиниці були: 1) полум’я звичайної свічки (свічки яка мала певну товщину та була виготовлена з певного матеріалу); 2) полум’я світильної лампи яка мала задані характеристики (задані розміри полум’я, заданий сорт палива, заданий режим горіння, тощо); 3) світло еталонної лампочки розжарювання включеної  в електричне коло з заданими параметрами; 4) світло яке випромінює 1см2 поверхні платини нагрітої до температури 2042К; 5) світло яке випромінює 1см2 поверхні абсолютно чорного тіла при його нагріванні до температури 2042К.

Сьогодні нема потреби формулювати та аналізувати все різноманіття раніше вживаних визначень кандели. Можна лише зауважити, що всі ці визначення певним чином формалізували ті зорові відчуття які отримує людина спостерігаючи за еталонним джерелом світла: полум’ям свічки, полум’ям світильної лампи, нагрітою спіраллю лампочки розжарювання, нагрітим до температури 2042К шматком платини.

На сьогоднішній день (з 1979 року) в міжнародній системі одиниць (СІ), прийнято наступне визначення. **Кандела**, це одиниця вимірювання сили світла, яка дорівнює силі світла такого джерела, що випромінює монохроматичне світло з довжиною хвилі 555нм при силі випромінювання в даному напрямку (1/683)Вт/ср. Дане визначення має ту перевагу, що по перше певним чином поєднує основну одиницю фотометричних величин з іншими одиницями СІ, зокрема з ватом, а отже з джоулем, ньютоном, тощо. По друге, за такого визначення, фактична величина кандели є такою, що не залежить від будови та принципу дії еталонного джерела світла. Важливо лише те, щоб це джерело випромінювало світло заданих частотних та енергетичних параметрів ( λ=555нм; Je=(1/683)Вт/ср).

Однак не варто думати, що вище сформульоване визначення кандели, однозначно відображає певний кількісний зв’язок між світловими та енергетичними величинами. Зокрема не правильно вважати, що кд=(1/683)Вт/ср; лм=(1/683)Вт; лм·с=(1/683)Дж). Не правильно бодай тому, що силі світла в одну канделу відповідає сила випромінювання в (1/683)Вт/ср тільки в тому випадку, якщо мова йде про монохроматичне світло з довжиною хвилі 555нм. Для світла ж інших довжин хвиль, це співвідношення є суттєво іншим.

Втім, наші зорові відчуття дійсно певним чином залежать від енергетичних параметрів світла і тому, між світловими та енергетичними величинами дійсно існує певний кількісний зв’язок. Однак, цей зв’язок є нелінійним та досить складним. А тому, говорити про математичне вираження цього зв’язку ми не будемо.

Визначивши основну одиницю фотометричних величин, не важко визначити всі інші фотометричні одиниці. Зокрема: **люмен**, це одиниця вимірювання світлового потоку, яка дорівнює такому світловому потоку, який в об’ємному куті один стерадіан створює силу світла в одну канделу, іншими словами:  лм = кд·ср.

Зважаючи на те, що в системі фотометричних величин фігурує об’ємний кут, буде не зайвим нагадати. **Об’ємний (тілесний) кут**, це фізична величина, яка характеризує кутові параметри тієї частини простору що обмежена конічною поверхнею, вершина якої співпадає з вершиною відповідного об’ємного кута, і яка дорівнює відношенню площі (ΔS) тієї частини сфери що обмежена відповідним кутовим конусом, до квадрату радіусу цієї сфери (R2).

Позначається: Ω  (омега)

Визначальне рівняння: Ω = ΔS/R2

Одиниця вимірювання:  [Ω] = ср,   (стерадіан).

**Стерадіан** (від грец. stereos – об’єм та лат.  radius – промінь, радіус), це одиниця вимірювання об’ємних кутів, яка чисельно дорівнює такому центральному об’ємному куту, який будучи проведеним з центру сфери радіусом R обмежує на її поверхні площу величиною R2.

Оскільки площа поверхні сфери визначається за формулою S=4πR2 то ясно, що величина того повного об’ємного кута який обмежений цією сферою дорівнює 4π стерадіан: Ω = S/R2 = 4πR2/R2 = 4π(ср). При цьому потрібно мати на увазі, що об’ємний кут не можливо виразити певним числом плоских кутів. Адже стверджувати, що в одному стерадіані міститься стільки то радіан або градусів, це все рівно ніби стверджувати, що в одному метрі квадратному міститься стільки то метрів.

Важливою характеристикою побутового джерела світла є його **світлова віддача** (n), тобто величина яка дорівнює відношенню того загального світлового потоку (Ф) що випромінює дане джерело світла, до величини спожитої ним електричної потужності (Р): n=Ф/Р. Наприклад, якщо лампа розжарювання потужністю 100Вт та світлодіодна лампа потужністю 12Вт, створюють однакові світлові потоки величиною 1200лм, то світлова віддача першої дорівнює 12лм/Вт, а другої 100лм/Вт. По суті це означає, що світлодіодна лампа є більш ефективним (енергозберігаючим) джерелом світла. Адже вона, при однаковій величині спожитої електроенергії випромінює у 8,3 рази більше світла аніж відповідна лампа розжарювання.

Як уже зазначалось, базовою фотометричною величиною є сила світла (J = ΔФ/ΔΩ). Адже наш зір сприймає не той загальний світловий потік (Ф) який випромінюється джерелом світла, а ту його частину яка направлена в нашу сторону і яка характеризується силою світла (J). Зважаючи на цей факт, а також на факт того, що паспортною характеристикою джерела світла є не сила світла (J), а світловий потік (Ф), важливо вміти за заданим світловим потоком визначати йому відповідну силу світла (J = ΔФ/ΔΩ).

Визначаючи величину тієї сили світла (J = ΔФ/ΔΩ) яку в заданому напрямку створює певне джерело світла, потрібно враховувати не лише величину того загального світлового потоку який випромінює це джерело, а й ті обставини які можуть спричиняти певний перерозподіл цього потоку. Скажімо, якщо світловий потік величиною 1200лм рівномірно розповсюджується у всіх можливих напрямках (мал.92а), тобто заповнює об’ємний кут 4π(ср), то в цьому випадку J=Ф/4π=95,5кд. Якщо ж те саме джерело світла знаходиться в певному світло відбивному плафоні який змушує світловий потік 1200лм заповнювати об’ємний кут π(ср) (мал.90г), то в цьому випадку J=Ф/π=382кд.

Мал.92. Джерело світла одне і теж, а створювана ним сила світла – різна.

**Словник фізичних термінів**

**Світловий потік** – це фотометрична величина, яка характеризує світлову потужність джерела світла і яка показує скільки світлової енергії (Q) випромінює дане джерело за одиницю часу, за умови, що величина цієї енергії визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається:  Ф

Визначальне рівняння:  Ф = Q/t

Одиниця вимірювання:  [Ф] = лм ,  (люмен).

**Сила світла** – це фізична величина, яка характеризує той світловий потік що розповсюджується в певному напрямку і яка дорівнює відношенню того світлового потоку ΔФ, що розповсюджується в межах певного об’ємного кута ΔΩ, до величини цього кута.

Позначається:  J

Визначальне рівняння: J = ΔФ/ΔΩ,

Одиниця вимірювання: [J] = кд,  (кандела).

**Кандела**, це одиниця вимірювання сили світла, яка дорівнює силі світла такого джерела, що випромінює монохроматичне світло з довжиною хвилі 555нм при силі випромінювання в даному напрямку (1/683)Вт/ср.

**Контрольні запитання**

1.В чому особливість фотометричних величин?

2. Чому, в якості основної одиниці вимірювання фотометричних величин обрано одиницю сили світла, а не скажімо, одиницю світлового потоку?

3. Які еталонні джерела світла застосовувались при визначені одиниці сили світла? Які недоліки мали такі визначення?

4. Чи випливає з визначення кандели, що між канделою та ватом існує співвідношення кд = (1/683)Вт/ср?

5. За яких умов справедливі співвідношення: кд=(1/683)Вт/ср; лм=(1/683)Вт; лм·с = (1/683)Дж)?

6. Скільки радіан міститься в одному стерадіані?

**§26. Освітленість. Закони освітленості.**

Світлова енергія (Q), світловий потік (Ф) та сила світла (J), фактично характеризують певні параметри джерела світла. В нашому ж повсякденному житті, нас зазвичай цікавлять не параметри джерела світла, а та кількість світлового потоку що потрапляє на ту чи іншу поверхню, – поверхню тієї стіни на яку ми дивимось, поверхню того стола за яким сидимо, поверхню тієї книги яку читаємо, тощо. Іншими словами, нас цікавить освітленість поверхні.

**Освітленість** – це фотометрична величина, яка характеризує ту кількість світлового потоку що потрапляє на одиницю площі поверхні і величина якої визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається: Е

Визначальне рівняння:  Е = ΔФ/ΔS, де ΔФ – величина того світлового потоку що потрапляє на поверхню площею ΔS

Одиниця вимірювання:  [Е] = лм/м2 =лк  , (люкс, від лат. lux – світло).

**Люкс** – одиниця вимірювання освітленості, яка дорівнює такій однорідній освітленості поверхні площею 1м2, при якій на цю поверхню падає світловий потік в один люмен, за умови, що поверхня є перпендикулярною до напрямку розповсюдження світлових променів (кут падіння променів дорівнює нулю).



Мал.93. Освітленість є тією фотометричною величиною яка регламентується певними медичними нормами.

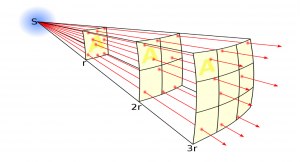
Про важливість тієї фотометричної величини яка називається освітленістю, говорить бодай той факт, що медичні норми регламентують не параметри джерела світла, а освітленість приміщень, робочих місць, тощо. Скажімо, згідно з цими нормами освітленість житлових приміщень має становити 100-200лк, а освітленість кабінетів загально освітніх шкіл – 300лк.

Освітленість вимірюють приладами які називаються **люксметрами**. В цих приладах світловий потік, потрапляючи на світлочутливий елемент (фотоелемент) призводить до певних змін того чи іншого електричного параметру цього елементу. Зазвичай, до зміни його електричного опору, або до генерації в ньому певної електричної напруги. При цьому, у відповідному електричному колі виникає певний електричний струм, величина якого пропорційна освітленості фотоелемента. Цей струм призводить до відповідного відхилення стрілки гальванометра, або до відповідних цифрових показань, які і вказують на числове значення освітленості.

Ясно, що в багатьох випадках потрібно не лише констатувати наявну освітленість, а й вміти передбачати її. Скажімо, на стадії проектування такого об’єкту як школа, потрібно вирішувати не лише будівельно-архітектурні питання, не лише питання опалення, водопостачання, електропостачання, каналізації, тощо, а й питання освітленості шкільних приміщень. Успішному вирішенню цих фотометричних питань, значною мірою сприяють знання тих законів, які називаються законами освітленості. З’ясовуючи суть цих законів звернемось до конкретної ситуації.

Припустимо, що в центрі сфери радіусом ? знаходиться точкове джерело світла, яке створює світловий потік Ф. Оскільки точкове джерело світла знаходиться в центрі сфери, то можна стверджувати: 1). Всі світлові промені є перпендикулярними до внутрішньої поверхні сфери, тобто такими, кут падіння яких дорівнює нулю (α=0°). 2). Освітленість кожної ділянки сфери є однаковою і тому величину цієї освітленості можна визначити за формулою  Е0=Ф/S, де S – загальна площа сфери  (S=4πl2); Ф – величина того загального світлового потоку, який створюється даним джерелом світла в об’ємному куті Ω=4π(ср). Зважаючи на те, що J = ΔФ/ΔΩ=Ф/4π, можна записати: Е0=Ф/S=Ф/4πl2=J/l2.

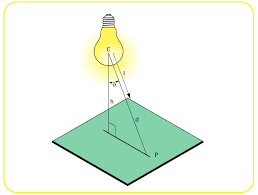
Таким чином: та освітленість яку створює точкове джерело світла на перпендикулярному до світлового потоку фрагменті поверхні, прямо пропорційна силі світла цього джерела (J) і обернено пропорційна квадрату відстані до нього (l2), тобто  Е0=J/l2. Дане твердження називають**першим законом освітленості**, або **законом обернених квадратів**.



Мал.94. Освітленість поверхні обернено пропорційна квадрату відстані до джерела світла.

Можна довести, що освітленість поверхні залежить не лише від величини падаючого світлового потоку, а й від просторової орієнтації поверхні відносно цього потоку, тобто від кута падіння світлових променів. Дійсно. Припустимо, що світловий потік Ф0 падає на поверхню площею S і що ця поверхня є перпендикулярною до потоку (кут падіння променів дорівнює нулю α0=0°). В такій ситуації, освітленість поверхні становитиме Е0=Ф0/S.

Із аналізу мал.95 ясно, що при повороті поверхні на кут α, величина потрапляючого на цю поверхню світлового потоку зменшується і стає рівною Ф=Ф0cosα.  А це означає, що відповідно змінюється і освітленість поверхні:  Е=Ф/S= Ф0cosα/S=E0cosα. А оскільки кут α фактично дорівнює куту падіння світлових променів, то можна стверджувати: освітленість даного фрагменту поверхні, пропорційна косинусу кута падіння світлових променів на цей фрагмент, тобто  Е=E0cosα. Дане твердження часто називають **другим законом освітленості**.



Мал.95 Освітленість поверхні пропорційна косинусу кута падіння світлових променів: Е=E0cosα.

Перший та другий закони освітленості можна об’єднати в єдиний **узагальнений закон освітленості**: та освітленість яку створює точкове джерело світла на будь якому малому фрагменті поверхні, визначається за формулою  E = Jcosα/l2 ,  де  J – сила світла даного точкового джерела світла; l – відстань від джерела світла до даного фрагменту поверхні; α – кут падіння променів на відповідний фрагмент поверхні.

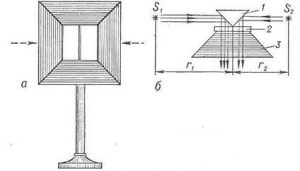
Потрібно зауважити, що вище сформульовані закони освітленості, вточності справедливі лише для точкових джерел світла. Однак, в багатьох практично важливих ситуаціях, ці закони можна застосовувати і тоді, коли джерело світла не є точковим. Загалом, прийнято вважати, що закони освітленості дають прийнятно точні результати в тих випадках, коли лінійні розміри джерела світла (d) не перевищують десятої частини відстані до освітлюваної поверхні (d≤0,1l).

Застосовуючи закони освітленості, потрібно мати на увазі  факт того, що та результуюча освітленість яка створюється системою багатьох джерел світла, дорівнює алгебраїчній сумі освітленостей створюваних кожним окремим джерелом системи: Ерез = Е1 + Е2 + …+ Еn.

Дослідження показують, що людині візуально важко кількісно визначити на скільки освітленість однієї поверхні відрізняється від освітленості іншої поверхні. Однак людина може достатньо точно визначити момент того, коли дві однакові, близько розташовані поверхні є однаково освітленими, тобто коли E1=E2. Цей факт, а також факт того, що освітленість поверхні певним чином залежить від сили світла джерела та відстані до нього (для α=0°, Е=J/l2), лежить в основі порівняльного методу вимірювання сили світла. Суть цього методу полягає в наступному.

Два джерела світла (мал.96) одне з яких є еталонним, тобто таким сила світла якого наперед відома (J1), розташовуються таким чином, що їх паралельні світлові потоки потрапляють на суміжні частини екрану, в якості якого зазвичай застосовують матове напівпрозоре скло. Переміщуючи джерела світла досягають того, щоб освітленості обох частин екрану були однаковими (Е1=Е2). Вимірявши відстані від джерел світла до екрану (l1; l2) та виходячи з того, що  J1/l12=J2/l22 , визначають невідому величину сили світла: J2=J1(l22/l12).

Прилад, який дозволяє реалізовувати вище описаний спосіб визначення сили світла заданого джерела, називають **фотометром.**



Мал.96. Схема устрою та принципу дії фотометра.

Завершуючи коротку розмову про той розділ оптики, який називається фотометрією, ще раз наголосимо на тому, що в сучасній науці існує два розділи фотометрії: світлова фотометрія та енергетична фотометрія. Вони відрізняються тим, що в світловій фотометрії параметри світла оцінюються за суб’єктивними зоровими відчуттями людини, а в енергетичній фотометрії – за об’єктивними показаннями загально прийнятих енерговимірювальних приладів. При цьому в кожній фотометрії існує своя система фізичних величин та їм відповідних одиниць вимірювань. Цю систему можна представити у вигляді наступної порівняльної таблиці.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Фотометрія світлова** | | **Фотометрія енергетична** | |
| **Фізична величина** | **Од.вим** | **Фізична величина** | **Од.вим** |
| **Світлова енергія     Q** | **лм·с** | **Енергія випромінювання    Qe** | **Дж** |
| **Світловий потік     Ф=Q/t** | **лм** | **Потік випромінювання     Фe=Qe/t** | **Вт** |
| **Сила світла            J=Ф/Ω** | **кд** | **Сили випромінювання       Je=Фe/Ω** | **Вт/ср** |
| **Освітленість          Е=Ф/S** | **лм/м2** | **Інтенсивність випр-ня       Re=Фе/S** | **Вт/м2** |

В побутовій практиці параметри світла ми оцінюємо за нашими зоровими відчуттями. І в цьому сенсі, більш близькою до вимог повсякденного життя є світлова фотометрія. Власне тому, в межах програми загальноосвітньої школи вивчається саме світлова фотометрія. Однак якщо мова йде про безумовно об’єктивне оцінювання енергетичних параметрів світла та його зв’язків з іншими проявами енергії, то в цьому сенсі більш близькою до сучасної науки (науки як цілісної системи знань) є енергетична фотометрія.

Втім, між енергетичною та світловою фотометріями існують очевидні аналогії та чітко визначені співвідношення. Тому вивчаючи світлову фотометрію, ви автоматично вивчаєте й фотометрію енергетичну. І навпаки.

**Словник фізичних термінів**

 **Освітленість** – це фотометрична величина, яка характеризує ту кількість світлового потоку що потрапляє на одиницю площі поверхні і величина якої визначається за зоровими відчуттями людини.

Позначається: Е

Визначальне рівняння:  Е = ΔФ/ΔS

Одиниця вимірювання:  [Е] = лм/м2 =лк , (люкс).

**Узагальнений закон освітленості** – це закон, в якому стверджується: та освітленість яку створює точкове джерело світла на будь якому малому фрагменті поверхні, визначається за формулою  E = Jcosα/l2 ,

де  J – сила світла даного точкового джерела світла;

l – відстань від джерела світла до даного фрагменту поверхні;

α – кут падіння променів на відповідний фрагмент поверхні.

**Контрольні запитання**

1.Чи є освітленість характеристикою певного джерела світла?

2. Що характеризує освітленість?

3. Від чого залежить освітленість поверхні?

4. Від чого залежить яскравість поверхні?

5. Поясніть загальний устрій та принцип дії люксметра.

6. Поясніть загальний устрій та принцип дії фотометра.

7. Телевізор дивляться: а) в темній кімнаті; б) в освітленій кімнаті. В якому випадку система зору буде в більшому напружені? Чому?

**Вправа 13.**

1.На висоті 1,8м над горизонтальною поверхнею стола висить лампочка, сила світла якої 150кд. Визначити освітленість столу під лампочкою. Якою стане ця освітленість після того як лампочку опустять на 30см?

2. Світло від лампочки (160кд) падає на фрагмент поверхні стола під кутом 30? та забезпечує освітленість 60лк. На якій відстані від даного фрагменту знаходиться лампочка?

3. Промені Сонця що заходить падають на землю під кутом 85°. У скільки разів освітленість повернутої до Сонця вертикальної стіни, буде більшою за освітленість горизонтальної поверхні землі?

4. Електрична лампочка що знаходиться на відстані 12м від даного фрагменту стіни, створює освітленість 2лк при куті падіння променів 45°. Яка сила світла лампочки?

5. Над центром круглого столу радіусом 0,5м, на висоті 1,5м висить лампочка, сила світла якої 200кд. Визначте освітленість столу в його центрі та на краях.

6. На висоті 3м натягнуто канат, на якому на відстані 2м одна від одної висять три лампочки по 200кд. Визначте освітленість поверхні під кожною лампочкою.

7. Відстань від точкового джерела світла силою J, до екрану дорівнює l. Як зміниться освітленість центру екрану, якщо з другої сторони джерела, на відстані l від нього паралельно екрану поставити плоске дзеркало?

**Фотоколориметрія. Кількісне визначення феруму (ІІІ) та дихромату калію у досліджуваних зразках.**

***1.Теоретична частина***

***Молекулярно-абсорбційний*** спектральний аналіз (фотометричний аналіз) включає фотоколориметричний і спектрофотометричний види аналізу.

***Фотоколориметричний аналіз*** оснований на порівнянні інтенсивності забарвлення досліджуваного розчину і стандартного розчину певної концентрації.

* 1. ***Закони поглинання випромінювання***

Коли пучок монохроматичного світла з інтенсивністю *І0* проходить крізь забарвлений розчин певна частина світла *(Іr)* відбивається, інша *(Ia)* — поглинається, а решта *(It)* — проходить крізь шар розчину:

***I0=Ir + Ia + It***

Оскільки у фотометрії порівнюють розчини з однаковою товщиною шару, то величиною *Іr* можна знехтувати, тоді дістанемо:

***I0= Ia + It***

Таким чином, світловий потік при проходженні крізь розчин втрачає частину своєї інтенсивності. У 1760 р. вчені П. Бугер і І. Ламберт встановили, що ***здатність розчину поглинати світло певної довжини хвилі залежить від товщини шару І*** і визначається за формулою

***It* = *I0* ·10-*kl***

де *k* — коефіцієнт поглинання, який є сталою величиною для певного розчину.

В логарифмічній формі:

**lg** *І* 0 **= *kl***

*І r*

*Це* рівняння є ***математичним виразом закону Бугера— Ламберта.***

У 1862 р. А. Бер встановив зв'язок між інтенсивністю потоку світла та концентрацією речовини в розчині, який полягає в тому, *що* ***поглинання світла прямо пропорційне концентрації речовини, крізь розчин якої проходить світло.***

Об'єднаний закон відомий під назвою **закону Бугера— Ламберта—Бера** і є основним законом поглинання світла розчинами: ***"Поглинання монохроматичного світла розчином прямо пропорційне концентрації речовини, що поглинає світло, і товщині шару розчину, крізь який воно проходить".***

В інтегральній формі цей закон виражають таким рівнянням:

***It* = *I0*** ·10-*kcl*

після логарифмування якого дістанемо:

***D =* lg** *І* 0 **= *kcl***

*І r*

де ***D*** - оптична густина розчину*; k* — коефіцієнт пропорційності; *с* — концентрація розчину, моль/дм3; ***l*** — товщина шару розчину, см.

Коефіцієнт пропорційності *k* — це показник поглинання розчину з концентрацією і товщиною шару, що дорівнюють одиниці. Він є характерним фізико-хімічним параметром для кожної забарвленої речовини.

Якщо концентрація розчиненої речовини становить 1 моль/дм3, то показник поглинання розчину *k* за товщини шару розчину 1 см називають ***молярним коефіцієнтом поглинання*** і позначають ε . Він є мірою здатності речовини вбирати світло за певної довжини хвилі, залежить від її природи і дає можливість оцінити чутливість фотометричних методів:

ελ = *D*

*cl*

Оптичну густину розчину з масовою часткою розчиненої речовини, що дорівнює 1% за товщини шару розчину 1см,

називають ***питомим коефіцієнтом поглинання*** *і* позначають

:

1%

1*см*

*А*

𝐴1% = 𝐷λ ,

1см

𝑤𝑙

де ω —масова частка розчиненої речовини, %.

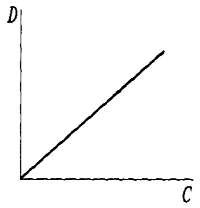
Отже, **оптична густина розчину залежить від концентрації речовини, її природи і товщини шару розчину, крізь який проходить світло.**

Графічну залежність оптичної густини від концентрації переважно виражають прямою лінією, яка проходить через початок координат (рис.1).

Для отримання спектральної характеристики забарвленої речовини потрібно взяти з літературних даних або визначити експериментально **спектр поглинання,** що є графічною залежністю молярного коефіцієнта поглинання ε або оптичної густини ***D*** від довжини хвилі **λ** (рис.2). Спектрограма є індивідуальною характеристикою речовини, яка поглинає світло. На вивченні спектрів поглинання ґрунтується якісний аналіз сполук. У кількісному аналізі користуються заздалегідь встановленими спектральними характеристиками тієї чи іншої речовини. Для отримання спектра треба зробити серію вимірювань оптичної густини розчину за різних довжин хвиль. За отриманими даними побудувати графічну залежність у координатах: вісь абцис

- довжина хвилі, вісь ординат - оптична густина, або молярний коефіцієнт світлопоглинання.

У забарвлених речовин максимум світлопоглинання спостерігається у видимій частині спектра. Забарвлення розчину є додатковим до кольору випромінювання, що поглинається (тобто до кольору світлофільтра). Наприклад, розчин синього тіоціанатного комплексу кобальту в ацетоні інтенсивно поглинає оранжеву частину спектра (600...650 нм). Довжина хвилі, при якій спостерігається максимальне поглинання, позначається **λmax**, а молярний коефіцієнт поглинання – **εmax**.



*Рис. 1*. ***Залежність оптичної густини розчину від молярної концентрації***



*Рис.2.* ***Спектр поглинанна водно-ацетонового розчину тіоціанатного комплексу кобальту.***

За спектром поглинання можна вибрати оптимальну довжину хвилі (***λмакс***) для аналітичного визначення речовини, причому найбільша чутливість відповідає максимуму світлопоглинання.

Відношення інтенсивності потоку випромінювання, що пройшло крізь досліджуваний розчин, до інтенсивності початкового потоку випромінювання називають **прозорістю**, або

**пропусканням**, і позначають літерою ***Т****:*

***Т*** *= It* 10

*I* 0

-εlc

**Пропускання** – це частина падаючого світла, яке пройшло крізь розчин. Оптична густина і пропускання пов’язані між собою таким співвідношенням:

***D = lg 1/T = -lgT = εlc***

Якщо пропускання ***Т*** виразити у відсотках, то

1

***D = lg***

*Т*

***·100 = 2 – lgT***

Із закону Бугера-Ламбер та-Бера випливає, що для однієї й

тієї самої речовини за однакової оптичної густини розчинів їх концентрації обернено пропорційні товщині шару розчинів, що поглинпють світло:

***l1c1 = l2c2***

*l*1  *c*2

*l*2 *c*1

Отже, **за однакової інтенсивності забарвлення двох розчинів однієї й тієї самої речовини концентрації розчинів обернено пропорційні товщині шару рідин.**

***Причини недотримання законуБугера - Ламберта - Бера***

1. Закон виведений і справедливий тільки для монохроматичного світла,тому недостатня монохроматизація може викликати відхилення від закону,і тим більшою мірою, чим менша монохроматизація світла.
2. У розчинах можуть перебігати різні процеси, які змінюють концентрацію поглинаючої речовини або її природу: гідроліз, іонізація, гідратація, асоціація,полімеризація, комплексоутворення тощо.
3. Світлопоглинання розчинів істотно залежить від рН розчину:
   * при зміні *рН* розчину може змінюватися ступінь іонізації слабкого електроліту;
   * може змінюватися форма існування іонів, що призводить до зміни характеру світлопоглинання;
   * при зміні *рН* розчину може змінюватися склад забарвлених комплексних сполук, що утворюються.

Тому закон справедливий для сильно розведених розчинів і область його застосування обмежена.

* 1. ***Вимоги до кольорових реакцій***

В основу колориметричних визначень покладено реакції утворення або руйнування сполук, здатних поглинати світло у видимій ділянці спектра.

Необхідною умовою застосування цього методу для аналізу безбарвних речовин у видимій ділянці спектра є переведення їх у забарвлені сполуки. З цією метою застосовують різні хімічні реакції — окиснення, відновлення, комплексоутворення тощо.

Усі кольорові реакції, які застосовують у фотометрії, мають відповідати таким вимогам:

1. утворення забарвленої сполуки має відбуватися з великою швидкістю;
2. отримана сполука повинна мати сталий склад і достатньо інтенсивне забарвлення; забарвлення має бути стійким і не руйнуватися під дією світла;
3. інтенсивність забарвлення розчину має підпорядковуватися закону Бугера - Ламберта - Бера.

Під час приготування забарвлених розчинів для фотометричних вимірювань слід дотримуватися таких правил:

1. До стандартного і досліджуваного розчинів добавляють однакові реактиви в тій самій послідовності і в однакових кількостях.
2. Забарвлені розчини, як стандартний, так і досліджуваний, готують одночасно.
3. Об'єми стандартного й досліджуваного розчинів мають бути однаковими.
4. Забарвлення досліджуваного і стандартного розчинів порівнюють за однакових умов.
   1. ***Методи вимірювання***

Інтенсивність забарвлення розчинів можна вимірювати різними методами. Розрізняють суб'єктивні (або візуальні) і об'єктивні (фотоколориметричні) методи колориметрії.

***Візуальними*** називають такі методи, при яких оцінку інтенсивності забарвлення розчину, який випробовують, здійснюють неозброєним оком. Ці методи нині використовують мало.

При об'єктивних методах колориметричного визначення для вимірювання інтенсивності забарвлення розчину, який досліджують, користуються фотоелементами. Визначення в цьому випадку проводять за допомогою спеціальних приладів - фотоколориметрів, а метод називають ***фотоколориметричним***.

* + 1. ***Візуальні методи***

До ***візуальних*** методів відносяться:

* метод стандартних серій;
* метод колориметричного титрування або дублювання;
* метод зрівнювання.

*Метод стандартних серій.* При виконанні аналізу методом стандартних серій інтенсивність забарвлення розчину порівнюють із серією спеціально приготованих стандартних розчинів (при однаковій товщині шару).

*Метод колориметричного титрування (дублювання).* Цей метод оснований на порівнянні забарвлення розчину, який аналізують, із забарвленням іншого розчину - контрольного. Контрольний розчин містить всі компоненти розчину, який досліджують, за винятком речовини, яку визначають. До нього додають з бюретки стандартний розчин речовини, яку визначають. Коли цього розчину буде додано стільки, що інтенсивності забарвлення контрольного і розчину, який аналізують, зрівняються, вважають, що в розчині, який аналізують, міститься стільки ж речовини, яку визначають, скільки її було введено в контрольний розчин.

*Метод зрівнювання -* відрізняється тим, що подібність забарвлень досягається зміною товщини шарів досліджуваного та стандартного розчинів. Для визначення концентрації речовин в останньому методі використовуються колориметри зливання і занурення.

*Переваги візуальних методів колориметричного аналізу:*

* проста техніка визначення; відсутність необхідності у використанні складного коштовного устаткування;
* око спостерігача може оцінювати не тільки інтенсивність, але й відтінки забарвлення розчинів.

*Недоліки візуальних методів колориметричного аналізу:*

* приготування стандартного розчину або серії стандартних розчинів;
* неможливість порівнювати інтенсивність забарвлення розчину у присутності інших забарвлених речовин;
* при тривалому порівнянні інтенсивності забарвлень око людини стомлюється і помилка визначення збільшується;
* око людини не таке чутливе до невеликих змін оптичної густини, пристрої; внаслідок цього неможливо зафіксувати різницю в концентраціях менше 5 відн. %.

Візуальну колориметрію нині використовують мало, вона має лише теоретичне значення.

* + 1. ***Фотоелектроколориметрія***

Фотоелектроколориметричні методи дають можливість виміряти інтенсивність поглинання світла за допомогою спеціальних приладів — фотоелектроколориметрів (ФЕК) або спектрофотометрів (СФ). Сучасні аналітичні лабораторії обладнані фотоелектроколориметрами різних типів: ФЕК-56-2, ФЕК-Н-57, КФК-2, КФК-3 тощо. Усі ці прилади складаються з освітлювача, світлофільтрів, фотоелементів, системи регулювання опорів, мікроамперметра. У комплект входить набір спеціальних кювет.

У фотоелектроколориметрії для вимірювання поглинання або пропускання світла забарвленими розчинами використовують світло з вузьким інтервалом довжин хвиль замість монохроматичного випромінювання.

Фотоелектричні методи вимірювання інтенсивності забарвлення пов'язані з використанням фотоелементів. Останні перетворюють світлову енергію в електричну, яка вимірюється мікроамперметром. Фотоелементи дозволяють проводити колориметричні визначення не тільки у видимій області, але також і в ультрафіолетовій та інфрачервоній областях спектра. Вимірювання світлових потоків за допомогою фотоелектричної фотометрії не залежить від особливостей ока спостерігача.

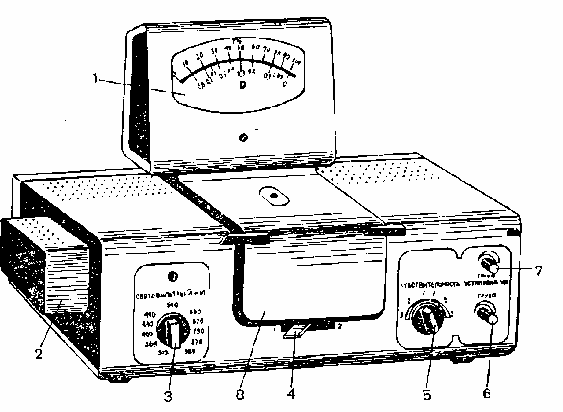
Використання фотоелементів дозволяє автоматизувати визначення концентрації речовин при хімічному контролі технологічних процесів. Внаслідок цього фотоелектроколориметрія широко використовується у практиці.

Фотоколориметри, залежно від кількості фотоелементів, які використовують при вимірюваннях, поділяють на дві групи:

а) фотоколориметри з одним фотоелементом (однопроменеві); б) фотоколориметри з двома фотоелементами (двопроменеві).

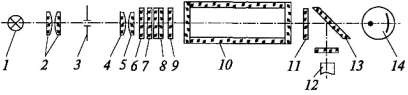
Так як точність вимірювань виконаних на однопроменевих фотоелектроколориметрах невелика, тому частіше використовуються двопроменеві.

Розглянемо принцип роботи фотоелектроколориметра з одним фотоелементом на прикладі одного із сучасних приладів — КФК-2 (колориметр фотоелектричний концентраційний). Він призначений для вимірювання коефіцієнтів пропускання й оптичної густини рідких розчинів у діапазонах довжин хвиль від 315 до 980 нм та визначення на основі цих даних концентрації речовин у розчинах (рис.3 ).



*Рис. 3 -* ***Фотоелектроколориметр КФК-2.***

1-мікроамперметр, 2-лампа розжарювання, 3-рукоятка для введення світлофільтрів, 4-перемикач кювет, 5-перемикач фотоприймача, 6-ручка «установка 100 грубо», 7-ручка «установка 100 точно», 8-кришка кюветного відділення



*Рис 4.* ***Схема фотоелектроколориметра з одним фотоелементом:***

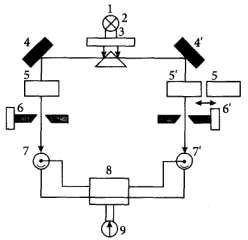
1 - лампа; 2 - конденсатор; 3 - діафрагма; 4,5 - об'єктиви; 6 - теплозахисний світлофільтр;7 - нейтральні світлофільтри; 8 - кольорові світлофільтри; 9,11 - захисні скла; 10 - кювета; 12 - фотодіод; 13 - пластина; 14 - фотоелемент.

Промені світла від лампи 1 проходять крізь конденсор 2, діафрагму З, об'єктиви 4, 5 і світлофільтри 6, 7, 8. Кювету 10 з досліджуваним розчином вводять у світловий потік між захисними стеклами 9,11. Пластина 13 розділяє світловий потік на два потоки: один потрапляє на фотодіод 12, другий — на фотоелемент 14.

Фотоприймачі працюють у різних ділянках спектра: фотоелемент у ділянці 315—540 нм, фотодіод — у межах 590— 980 нм. Підключення фотоприймачів здійснюється відповідним перемикачем. Струм фотоприймача підсилюється і подається на мікроамперметр, що фіксує струм, сила якого пропорційна інтенсивності світлового потоку, що проходить крізь досліджуваний розчин.

Розглянемо принцип роботи фотоелектроколориметрів з

двома фотоелементами.

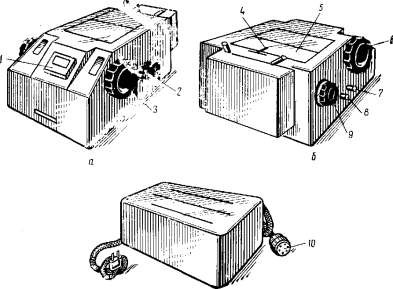
В основу конструкції цих приладів покладено принцип зрівнювання інтенсивності двох світлових пучків за допомогою змінної щілинної діафрагми, тобто принцип оптичної компенсації двох світлових потоків шляхом змін розкриття зіниці діафрагми.

*Рис.5.* ***Схема фотоелектроколориметра з двома фотоелементами:***

1 - джерело випромінювання; 2 - світлофільтр; 3 - лінза; 4,4'- дзеркала; 5,5'- кювети; 6 - фотометричний клин,6'- щілинна діафрагма; 7,7'- фотоелементи; 8 - підсилювач; 9 - прилад для реєстрації.

Світловий потік від лампи 1 проходить через світлофільтр, лінзу, ділиться на два потоки, які попадають на дзеркала 4,4', відбиваються від них, проходять через кювети 5, 5', фотометричний клин - 6, щілинну діафрагму 6', попадають на фотоелементи 7, 7'.

Фотометричний нейтральний клин 2 служить для послаблення світлового потоку, що попадає на фотоелемент 7.



*Рис 6.* ***Загальний вигляд фотоколориметра з двома фотоелементами ФЕК - 56М.***

а) вигляд спереду; б) вигляд ззаду;

1 - мікроамперметр; 2 - рукоятка перемикання кювет; 3 - відліковий барабан; 4 - рукоятка перемикання шторки 5 - кюветне відділення; 6 - відліковий барабан; 7 - рукоятка регулювання чутливості приладу; 8 - рукоятка регулювання інтенсивності світлового потоку; 9 - рукоятка встановлення свілофільтрів; 10 - блок живлення з шнуром для підключення.

Струм фотоприймача підсилюється і подається на мікроамперметр, що фіксує струм, сила якого пропорційна

інтенсивності світлового потоку, що проходить крізь досліджуваний розчин.

***Методи визначення концентрації у фотоелектроколориметрії***

У фотоелектроколориметрії для визначення концентрації речовини в розчині:

* метод порівняння оптичної густини стандартного і досліджуваного розчинів;
* метод визначення за середнім значенням молярного або питомого коефіцієнта поглинання;
* метод градуювального графіка;
* метод добавок.

***Метод порівняння оптичної густини стандартного і досліджуваного розчинів***

Для визначення готують стандартний розчин речовини, яку визначають, відомої концентрації, яка наближається до концентрації досліджуваного розчину. Визначають оптичну густину ***D****ст* цього розчину при певній довжині хвилі. Потім визначають оптичну густину ***D****х* розчину, який досліджують, при тій же довжині хвилі і при тій же товщині шару. Порівнюючи значення оптичної густини досліджуваного і стандартного розчинів, знаходять невідому концентрацію ***сх*** речовини, яку визначають:

с𝒙

= 𝑫𝒙 ∙ 𝒄ст

𝑫ст

Метод порівняння застосовують при однократних аналізах. Він вимагає обов'язкового дотримання основного закону світлопоглинання.

***Метод визначення за середнім значенням молярного коефіцієнта світлопоглинання.***

Це різновид методу порівняння. Готують стандартний розчин речовини, яку досліджують, відомої концентрації ***сст*** (моль/дм3) і вимірюють його оптичну густину ***Dст****.* Розраховують середнє значення молярного коефіцієнта поглинання:

𝜀̅ = 𝐷ст

сст ∙ 𝑙ст

Потім вимірюють оптичну густину розчину, який досліджують,

*D*х і за формулою основного закону світлопоглинання знаходять ***сх*** :

𝑐𝑥

= 𝐷𝑥

𝜀̅ ∙ 𝑙𝑥

Метод вимагає обов'язкового дотримання основного закону світлопоглинання і застосовується порівняно рідко.

***Метод градуювального графіка.***

Для визначення концентрації речовини цим методом готують серію з 5-8 стандартних розчинів різних концентрацій. При виборі інтервалу концентрацій стандартних розчинів керуються наступними положеннями:

* + він повинен охоплювати область можливих вимірювань концентрації розчину, який досліджують;
  + оптична густина розчину, який досліджують, повинна відповідати приблизно середині градуювальної кривої;
* бажано, щоб у цьому інтервалі концентрацій дотримувався основний закон світлопоглинання;
* величина оптичної густини повинна бути в межах 0,14-1,3. Вимірюють оптичну густину стандартних розчинів і будують графік залежності ***D*** від ***с*** (рис. 1). Визначивши ***Dх*** розчину, який досліджують, за градуювальним графіком знаходять ***сх****.*

Цей метод дозволяє визначити концентрацію речовини навіть у тих випадках, коли основний закон світлопоглинання не виконується. В цьому випадку готують велике число стандартних розчинів, відмінних за концентрацією не більше ніж на 10 %. Відтворюваність визначень у цьому випадку нижча, ніж у разі лінійної залежності ***D*** від ***с***.

***Метод добавок***

Це різновид методу порівняння, який грунтується на порівнянні оптичної густини розчину, який досліджують, і того ж розчину з добавкою відомої кількості речовини, яку визначають.

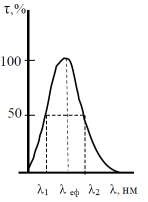
Метод добавок застосовують для усунення впливу сторонніх домішок, визначення малих кількостей речовини у присутності великих кількостей сторонніх речовин. Метод вимагає обов'язкового дотримання основного закону світлопоглинання. Розрахунок *сх* виконують за формулою:

с = 𝐷𝑥 ∙ 𝑐д х 𝐷д − 𝐷𝑥

де сд і Dд - концентрація і отична густина добавки речовини, що визначають.

***Послідовність визначення концентрації речовини в розчині***:

* + вибір методу;
  + вибір світлофільтра;
  + вибір кювети;
  + вимірювання оптичної густини розчинів та визначення концентрації речовини в досліджуваному розчині. ***Вибір світлофільтра.***

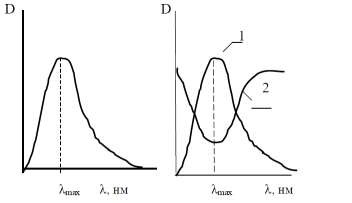
Важливим чинником у фотометрії, що впливає на чутливість визначення оптичної густини розчину, є правильний ***вибір світлофільтра***.

*Рис.7.* Спектр пропускання світлофільтру

Кожен світлофільтр має власну криву пропускання τ = f(λ)(рис.7) і характеризується двома сталими для кожного світлофільтру параметрами (вказуються в паспорті світлофільтру): а) **λ**еф – ефективна довжина хвилі, при якій пропускання максимальне;

б) (λ1 −λ2) - напівширина пропускання – це інтервал хвиль, при якому пропускання світла дорівнює 50%.

Кожна речовина характеризується своїм спектром поглинання(рис. 8) - **D = f( λ** ). Положення максимуму спектру поглинання ( ***λ max*** ), характер і вигляд спектру є важливими оптичними характеристиками речовини. У забарвлених речовин **λmax** лежить у видимій частині спектру.

Світлофільтр для роботи вибирають такий, щоб довжина хвилі, яка відповідає максимуму його коефіцієнта пропускання, збігалася з максимальною оптичною густиною досліджуваного розчину (рис.9).

*Рис.8*. Спектр поглинання *Рис.9*. Спектри поглинання: розчину 1 - розчин; 2 - світлофільтр

***Вибір кювети.*** Відносна похибка визначення концентрації речовини в розчині залежить від того, на якій ділянці шкали фотоелектроколориметра виконують визначення. Розрахунки й

досліди показали, що вона є найменшою за оптичної густини розчину, яка дорівнює 0,3—0,5. Тому під час роботи на приладі рекомендується, відповідно добираючи кювети, проводити визначення у межах цих значень оптичної густини.

Попередній вибір кювети проводять візуально, відповідно до інтенсивності забарвлення розчину. Якщо розчин інтенсивно забарвлений, то слід користуватися кюветами з малою робочою довжиною, і навпаки.

У заздалегідь підібрану кювету наливають розчин і вимірюють його оптичну густину. Значення оптичної густини розчину має становити 0,3—0,5, у разі отримання інших значень беруть кювету з більшою робочою довжиною, якщо ***D***<0,3, і з меншою — якщо ***D*** > 0,5.

Наявність у колориметрі вузла світлофільтрів і набору кювет дає змогу підібрати таку їх комбінацію, за якої похибка у визначенні концентрації буде найменшою.

***Побудова калібрувального графіка для певної речовини.*** Для побудови калібрувального графіка готують серію розчинів досліджуваної речовини з відомими концентраціями. Забарвлені стандартні розчини мають бути виготовлені за тих самих умов, що й забарвлені розчини досліджуваної речовини. За допомогою фотоелектроколориметра вимірюють оптичну густину всіх розчинів і будують калібрувальний графік, відкладаючи на осі абсцис значення молярної концентрації розчину, а на осі ординат

— відповідні їм значення оптичної густини (див. рис.1).

Калібрувальний графік будують окремо для кожної досліджуваної речовини. Слід зазначити, що навіть для забарвленого розчину тієї самої речовини, але приготовленого з іншим реактивом, значення оптичної густини може буде іншим, оскільки зміниться молярний коефіцієнт поглинання є. У разі заміни кювети також потрібно будувати інший калібрувальний графік, оскільки оптична густина змінюється зі зміною товщини шару розчину ***l***, крізь який проходить пучок світла.

***Умови і застереження при проведенні фотометричних вимірів:***

* кювети повинні бути чистими, зовнішні стінки сухими; до робочої поверхні кювети (нижче рівня розчину) не можна доторкатися пальцями;
* перед заповненням кювети обов’язково ополіскують розчином, що досліджують;
* кювети заповнюють до мітки, щоб увесь потік випромінювання проходив крізь шар розчину;
* кювети встановлюють у кюветну камеру завжди однаковим способом для уникнення помилок, пов’язаних із розсіюванням і віддзеркалюванням світла;
* вимірювання виконують тільки при щільно закритій кришці кюветної камери;
* товщину кювети вибирають таким чином, щоб значення оптичної густини, яку вимірюють, вкладалося в оптимальний інтервал 0,1-1,0.

***Порядок роботи на приладі КФК-2***

1. Прилад вмикають в електромережу за 25-30 хв. до початку роботи. Під час прогріву приладу кюветне відділення повинно бути відкрите (при цьому шторка перед фотоприймачами перекриває світловий потік).
2. Виставляють вибраний світлофільтр перемикачем світлофільтрів.
3. Встановлюють мінімальну чутливість колориметра. Для цього ручку "ЧУТЛИВІСТЬ" встановлюють в положення "1", ручку "УСТАНОВКА 100 ГРУБО" - в крайнє ліве положення.
4. Перед вимірюваннями і при перемиканні фотоприймачів провіряють встановлення стрілки колориметра на "0" по шкалі коефіцієнтів пропускання Т при відкритому кюветному відділенні. При відхиленні стрілки від нуля, її виставляють на нуль за допомогою потенціометра НУЛЬ, що виводиться під шліц.
5. В світловий потік вставляють в кюветотримач кювету з розчинником, а в другий кюветотримач кювету з досліджуваним розчином.
6. Закривають кришку кюветного відділення.
7. Ручками "ЧУТЛИВІСТЬ" і "УСТАНОВКА 100 ГРУБО" і

"ТОЧНО" встановлюють відлік 100 по шкалі ***t*** (світло пропускання) колориметра. Ручка ЧУТЛИВІСТЬ може бути в

трьох положеннях "1", "2", "3".

1. Ручкою зміни кювети замінюють кювету з розчинником на кювету з досліджуваним розчином.
2. Записують відповідний показник оптичної густини. Вимірювання виконують 3-5 раз. Обчислюють середнє арифметичне вимірювань і записують результат.
3. *Фотоелектроколориметричне визначення.*
   1. *Побудова калібрувального графіку.*
   2. З цією метою в 8 пронумерованих колб місткістю 50,0 см3 вносять 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4 1,5; см3 стандартного розчину солі Фе-руму(ІІІ). У кожну колбу доливають по 2,0 см3 нітратної кислоти (1:1) і 5,0 см3 10% розчину амоній тіоціанату, доводять об'єм водою до позначки і перемішують.

Оптичну густину розчинів вимірюють на фотоелектроколориметрі КФК-2 у відповідних кюветах при вибраному світлофільтрі, результати заносять в таблицю.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Кількість розчину (мл)  феруму(ІІІ) | Кількість (мг) феруму(ІІІ) | ***D1*** | ***D2*** | ***D3*** |
| 0,2 |  |  |  |  |
| 0,4 |  |  |  |  |
| 0,6 |  |  |  |  |
| 0,8 |  |  |  |  |
| 1,0 |  |  |  |  |
| 1,2 |  |  |  |  |
| 1,4 |  |  |  |  |
| 1,5 |  |  |  |  |

На підставі отриманих даних будують калібрувальний графік, відкладаючи на осі абсцис значення молярної концентрації розчину, а на осі ординат — відповідні їм значення оптичної густини (рис.1), за допомогою якого визначають концентрацію йонів Феруму(ІІІ) в досліджуваному розчині.

* 1. *Визначення концентрації невідомого розчину***.**
  2. Виміряти оптичну густину розчину з невідомою концентрацією, на осі ординат знайти точку, яка відповідає значенню *Dx*, через цю точку провести лінію паралельно осі абсцис до перетину з графіком. Точку перетину з графіком спроектувати на вісь концентрацій і прочитати одержане число Cх.

# Питання для самоконтролю

1. Суть методу фотоколориметрії. 2.Основний закон світлопоглинання.
2. З яких етапів складається колориметричне визначення ? 4.Які переваги методу колориметрії ?
3. Які характеристики необхідно враховувати для повного переведення йона, який визначають, у забарвлену сполуку ?
4. Назвіть причини зміни складу забарвлених сполук. 6.Обмеження та умови застосування закону Бугера- Ламберта-Бера.
5. Як залежить чутливість колориметричного визначення від молярного коефіцієнта поглинання ?
6. Що таке оптична густина розчину ?
7. Як змінюється оптична густина розчину залежно від концентрації, товщини шару розчину та молярного коефіцієнта поглинання?
8. В яких ділянках спектра проводять фотометричний аналіз?
9. Яким законом описують залежність поглинання від концентрації речовини і товщини шару розчину?
10. У чому полягає принцип вибору світлофільтрів?

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ**

**В АНАЛІТИЧНІЙ ХІМІЇ**

Одна з основних сфер застосування математичної статистики – це дослідження, пов'язані з аналізом речовини та іншими лабораторними та технологічними вимірюваннями. Кожна нова сфера застосування математичної статистики потребує свого особливого методичного підходу. Досвід, отриманий у ході статистичних досліджень в одній галузі, не можна механічно переносити на сусідні, навіть близькі сфери. Наприклад, математична теорія похибок, розроблена на основі завдань метрології та геодезії, не може бути без істотного видозмінення перенесена в аналітичну хімію. Тому поряд із науковою літературою загального характеру з математичної статистики з'явилася потреба в спеціалізованих довідниках, розрахованих на працівників цієї вузької галузі.

Застосування математичної статистики в межах якої-небудь однієї наукової дисципліни завжди пов'язане з поглибленим опрацюванням певних її аспектів. У лабораторних роботах, зокрема під час аналізу речовини математичну статистику застосовують переважно для згортання та аналізу експериментального матеріалу методами, що ґрунтуються на теорії ймовірностей. Це зумовлено тим, що в дослідних роботах доводиться мати справу з дією і взаємодією великої кількості факторів, які важко обліковувати, тому проведення однієї серії експериментів зазвичай не дає можливості виявити наявні фізичні закономірності. Ці закономірності можуть бути виявлені тільки в разі порівняння результатів досліджень різних об’єктів, виконаних у різних умовах і різних лабораторіях. Таке порівняння стає можливе тільки в тому випадку, якщо результати досліджень за допомогою математичної статистики подано в компактній формі, зручній для зберігання, передачі та подальшої обробки. Згортання інформації полягає, наприклад, у тому, що за допомогою апарату математичної статистики всю інформацію про точність аналітичного методу можна подати у вигляді функції (закону) розподілу помилок цього методу з певними параметрами розподілів: дисперсією або середнім квадратичним відхиленням і математичним сподіванням.

В аналітичній роботі часто доводиться обмежуватися порівняно невеликою кількістю визначень. Цю невелику кількість спостережень можна розглядати як випадкову вибірку з деякої гіпотетично нескінченної кількості – генеральної сукупності, яка служить математичною моделлю реально спостережуваних величин. Завдання згортання інформації з математичного погляду можна звести в цьому випадку до визначення за вибіркою деяких величин (вибіркової дисперсії й середнього арифметичного значення випадкової величини), що є оцінкою невідомих параметрів (відповідно дисперсії та математичного сподівання) функції розподілу цієї генеральної сукупності. У разі оцінювання параметрів генеральної сукупності за вибіркою має місце відомий елемент невизначеності, який можна розрахувати методами математичної статистики. Сучасна математична статистика дає можливість оцінювати параметри генеральних сукупностей і встановлювати для них довірчі межі навіть за досить малими вибірками, у деяких випадках – усього за двома вимірами. Але при цьому чим менший експериментальний матеріал, тим менш точно може бути здійснена оцінка параметрів генеральної

сукупності за їх вибірковим значенням. Таким чином, математична статистика, з одного боку, дає можливість компактним чином подати результати експерименту, а з іншого – дозволяє кількісно оцінити той елемент сумніву, який супроводжує кожний експеримент за малої кількості дослідів.

# ПОДАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Зазвичай метою кількісного хімічного аналізу є встановлення концентрації *С* визначуваної речовини (аналіту) в зразку. Це можливо, якщо аналіт розподілений за зразком гомогенно, як, наприклад, у водному розчині. Якщо аналіт розподілений за зразком негомогенно, то визначають його вміст *N*, значення, віднесене або до маси зразка, або до його об'єму, або до площі поверхні. Визначення можна проводити як за допомогою будь-яких приладів (інструментальні методи аналізу), так і без них (хімічні методи аналізу). У ході аналізу вимірюють аналітичний сигнал *у* (сила струму, напруга, оптична густина, доданий до аналізованого розчину об’єм титранту, що зумовив зміну забарвлення індикатора в процесі титрування, і т. д.), зв'язаний із концентрацією або вмістом аналіту в зразку функціональною залежністю

*y = f(x) +* *x.* (1)

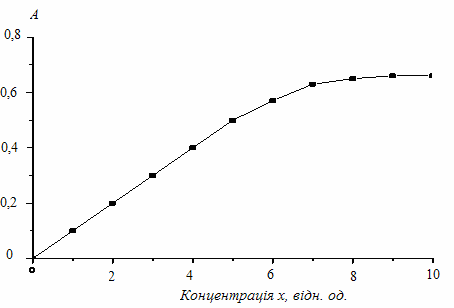
У формулі (1) *x* дорівнює *C* або *N*; функція *x* описує структуру похибки і включає як функцію, пов'язану з використанням вимірювального приладу пр, так і функцію розподілу випадкової похибки. Функцію пр можна визначити в разі проведення холостого досліду, тобто у випадку аналітичного сигналу від зразка, що відрізняється від досліджуваного тільки відсутністю аналіту.

Наявність випадкової похибки призводить до того, що дані, отримані в ході проведення паралельних вимірів (кілька вимірів величини аналітичного сигналу для одного й того ж зразка), як правило, різняться між собою. Заздалегідь передбачити значення випадкової похибки неможливо.

Функція *f (x)*, називана математичною моделлю, у деяких випадках може бути визначена наперед із відомих хімічних або фізичних законів. Під час виконання лабораторного практикуму вона відома й має бути подана в тексті опису виконуваної роботи. Функції *f(x)* та *x* ніяк не пов'язані між собою.

Типовий графік залежності функції відгуку *y* (наприклад, оптичної густини *А*) від концентрації аналіту *C* в пробі наведено на рис. 1. Такий графік називають калібрувальним або градуювальним. Він дозволяє перерахувати значення аналітичного сигналу в значення концентрації.

Отримані під час проведення аналізу вихідні експериментальні дані необхідно подати у вигляді таблиці або графіка. Дані, наведені у вигляді таблиці використовують, коли потрібна їх подальша обробка (табл. 1). У вигляді таблиці, яка підсумовує результати статистичного аналізу експериментальних даних, зручно подавати остаточні результати роботи.



**Рис. 1. Графік залежності оптичної густини (для заданої довжини хвилі) від концентрації аналіту в пробі**

У разі використання таблиці необхідно в правій частині аркуша над таблицею вказати її номер, а в наступному рядку вказати назву, яка повинна бути вирівняна по центру рядка.

Таблиця 1. Зразок оформлення експериментальних даних

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер серії | Результати визначення | Кількість варіант у кожній серії вимірів | Середнє арифметичне для кожної серії вимірів | Стандартне відхилення |
| 1 | *x*11 *x*12 *x*13  …  *x*1*n*1 | *n*1 | *X*1 | *s*1 |
| 2 | *x*21 *x*22 *x*23  …  *x*2*n*2 | *n*2 | *X* 2 | *s*2 |
| … | …  …  …  …  … | … | … | … |
| *k* | *xk*1 *xk*2 *xk*3  …  *xknk* | *nk* | *X k* | *sk* |

У кожному стовпці таблиці містяться дані, отримані в ході однієї серії експерименту. Під серією розуміють низку виміряних величин, які з погляду статистики еквівалентні одна одній, тобто результати, отримані одним методом і в одних умовах.

*Приклад 1*. Під час стандартизації 10 мл 0,1 М розчину нітратної кислоти 0,1 М розчином NaOH група студентів отримала деякі експериментальні дані. Подати їх у вигляді таблиці (наприклад, табл. 2).

Таблиця 2. Визначення загальної лужності природної води методом ацидометрії

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *K* | *n*1 | *n*2 | *n*3 | *n*4 | *n*5 | *n*6 | *n*7 | *n*8 |
| *V*1*,* мл | 9.7 | 9.7 | 9.7 | 9.5 | 9.7 | 9.6 | 9.3 | 9.7 |
| *V*2*,* мл | 9.8 | 9.7 | 9.7 | 9.8 | 9.7 | 9.7 | 9.7 | 9.8 |
| *V*3*,* мл | 9.8 | 9.8 | 9.8 | 9.0 | 9.9 | 10.0 | 10.1 | 9.8 |
| *nk* | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| *X k* | 9.77 | 9.73 | 9.73 | 9.77 | 9.77 | 9.77 | 9.70 | 9.77 |
| *sk* | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.25 | 0.12 | 0.21 | 0.40 | 0.06 |

Якщо проведено виміри тільки для однієї групи даних, то в таблиці рядки можна поміняти місцями зі стовпцями (табл. 3).

Таблиця 3. Подання результатів експерименту

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Експериментальні дані | | | | Кількість  вимірів | Середнє арифметичне | Стандартне  відхилення |
| *x*1 | *x*2 | … | *xn* | *n* | *X* | *s* |

Заповнюючи таблицю, необхідно дотримуватися таких правил:

* експериментальні дані необхідно розташовувати в порядку зростання або зменшення;
* усі рядки (ліворуч) та стовпці (зверху) повинні мати назву й містити відомості про розмірності наведених величин (доцільно використовувати систему СІ);
* у сучасній науковій літературі прийнято цифри в десятковому дробі розділяти крапкою, а не комою;
* точність наведених у таблиці розрахункових величин не повинна перевищувати точності вихідних експериментальних даних.

Точність подання результатів відзначається кількістю значущих цифр. *Значущими* називають усі достовірні цифри та першу недостовірну, тобто всі результати необхідно округляти до першої недостовірної цифри. Для оцінки недостовірності результатів аналітичних визначень необхідно враховувати реальні можливості методу або методики, застосованих у ході проведення експерименту. Статистичним критерієм може служити, наприклад, стандартне відхилення або довірчий інтервал. У разі відсутності таких відомостей беруть недостовірність +1 в останній значущій цифрі. Наприклад, у випадку титрування

першою недостовірною цифрою буде 1/4 ціни поділки бюретки. Якщо за першою недостовірною цифрою йде цифра «5» або більша, то округлюють у бік більшого значення першої недостовірної цифри, якщо ні, то її не змінюють.

Якщо за першою недостовірною цифрою йде цифра «5», округлюють у бік найближчого парного числа. Наприклад, число 20.354 слід округлити до 20.35, а число 20.356 – до 20.35. Рекомендують округляти кінцевий результат після виконання всіх арифметичних дій.

Нуль у числах може бути значущий і незначущий. Нулі, що стоять на початку числа, завжди незначущі й служать лише для зазначення місця крапки в десятковому дробі. Наприклад, число 0.007 містить лише одну значущу цифру. Нулі, які стоять між цифрами, завжди значущі. Так, у числі 0.102 три значущі цифри. Нулі в кінці числа можуть бути значущі та незначущі. Нулі, що стоять після крапки в десятковому дробі, вважають значущими. Наприклад, у числі 6000.0 п'ять значущих цифр. Нулі в кінці цілого числа можуть бути значущі, а можуть просто вказувати порядок величини. Так, у числі 500 значущих цифр може бути: одна (5), дві (5 і 0), три (5, 0 і 0). Щоб уникнути невизначеності, доцільно в таких випадках подавати число в нормальному вигляді, тобто у вигляді добутку: *n*·10*m* , де *n –* число, що містить тільки значущі цифри; *m* – показник степеня для подання цього числа в нормальному вигляді. Наприклад, якщо в числі 500 одна значуща цифра, його слід подати як 5·102, якщо дві значущі цифри – 5.0·102, якщо три значущі цифри – 5.00·102 .

*Додавання і віднімання.* Значущість суми або різниці зумовлена значущістю числа з найменшою кількістю десяткових знаків. Наприклад, у випадку додавання чисел 28.3, 5 і 0.46 значущість зумовлена недостовірністю числа 5, отже, суму

чисел 33.76 слід округлити до 34.

Числа, що містять степені, перетворюють, зводячи показники степенів доданків до найбільшого. Наприклад, у разі додавання чисел 2·10-4, 6.0·10-2 і 2,5·10-3 їх треба подати таким чином: 0.02·10-2, 6.0·10-2 і 0.25·10-2. Згідно з правилом значущості суми чисел отримуємо 6,3·10-2, оскільки значущість суми зумовлена значущістю числа 6,0·10-2, що має найменшу кількість десяткових знаків.

*Множення і ділення.* Для оцінки значущості добутку (або частки) зазвичай застосовують таке правило: значущість добутку (або частки) зумовлена значущістю співмножника з найменшою кількістю значущих цифр. Наприклад, перемножування чисел 2.7 і 3.45 дає добуток, що містить дві значущі цифри, а саме 9.3.

*Піднесення до степеня*. У разі піднесення числа до степеня відносна недостовірність результату збільшується в кількість разів, яка дорівнює степеню. Наприклад, у випадку піднесення до квадрата вона подвоюється.

*Добуття квадратного кореня.* Відносна недостовірність результату добуття кореня вдвічі менша відносної недостовірності підкореневого числа, тому в деяких випадках після добуття кореня кількість значущих цифр збільшується.

Наприклад, = 1.414, відносні недостовірності числа 2.00 і результату добуття

2

кореня дорівнюють 1·10-2 і 0.005 відповідно, отже, невизначеність – у третьому знаку після крапки.

*Логарифмування.* У випадку логарифмування кількість значущих цифр у мантисі дорівнює кількості цифр, яку містив нестепеневий член числа. Характеристика логарифма не входить до значущих цифр, оскільки вона вказує лише на порядок логарифмованого числа. Наприклад, lg 0.l·10-2 = -3.0; 1g 0.10·10-2=-3.00; lg 0.l=-1.0. Абсолютна недостовірність логарифма приблизно у

* 1. разу менша відносної недостовірності числа під логарифмом. Наприклад, якщо логарифм відомий із точністю 1·10-3, відносна похибка логарифмованої величини складає не менше ніж 2.5·10-3. У випадку обчислення антилогарифмів кількість значущих цифр зменшується; наприклад, antlg 10.23= 1.7·1010.

Якщо вигляд функціональної залежності аналітичного сигналу від концентрації аналіту в пробі описано рівнянням (1), то разом із таблицею експериментальні дані необхідно подавати і у вигляді графіка. Це дозволить зробити попередні висновки про наявність грубих помилок і можливий вигляд функціональної залежності аналітичного сигналу від концентрації аналіту в пробі.

Під час оформлення графіка необхідно дотримуватися таких правил:

* + - підпис до рисунка разом із порядковим номером слід ставити під рисунком;
    - рисунок із підписом повинен займати половину сторінки формату А4;
    - рисунки бажано розташовувати внизу або вгорі сторінки, поруч із місцем їх першого згадування;
    - у підписі до рисунка треба вказувати всі дані, пов'язані з умовами проведення експерименту, які не відображені в тексті звіту;
    - усі осі координат повинні мати позначення, а також розмірність (бажано в системі СІ);
    - числа біля осей координат мають змінюватися на однакову кількість одиниць

(як правило, кратну 0.1, 1, 2, 5 або 10);

* + - якщо передбачено, що за відсутності аналіту аналітичний сигнал дорівнює нулю, то графік необхідно проводити з нуля, у противному разі графік проводять із першої експериментальної точки з мінімальною концентрацією аналіту;
    - числа біля осей координат повинні відповідати цифрам із першого десятка, помноженим на 10 у степені -1, або 0, або 1. Якщо числа відрізняються від зазначених, то після нумерації осі цифрами з першого десятка вказують відповідний степінь у вигляді *R*·10*p*, або *R*·10*-p*, де *R* – ціле число; *p* – показник степеня, а далі – розмірність. Наприклад, якщо вимірюваний діапазон концентрацій змінюється від 0 до 0.001 моль/л, то біля осі необхідно вказати **0, 1,**

# ..., 10 *С*·104, моль/л або 0, 1, ..., 10 *С*·10-4 моль/л;

* + - якщо досліджуваний діапазон концентрацій становить кілька порядків, то для нумерації осі використовують логарифмічну шкалу, а далі вказують **lg*C*, моль/л**. Наприклад, якщо виміри проводили для концентрації 1·10-6, 1·10-5, 1·10-4, 1·10-3 моль/л, то нумерація осі має вигляд **-6, -5, -4, - 3 lg*C*, моль/л**;
    - якщо на рисунку наведено кілька графіків, то всі вони мають бути позначені цифрами або буквами, а підпис під рисунком повинен містити інформацію про відмінність цих графіків.

Залежно від виду експериментальної роботи вона може містити дані, наведені як у вигляді таблиць, так і у вигляді графіків.

# ПОХИБКИ ВИМІРІВ

Під час проведення хімічного експерименту виникають похибки результатів вимірів різної природи.

**Похибка виміру -** відхилення результатів виміру від справжнього значення вимірюваної величини. Похибка виникає через недосконалість процесу виміру.

Конкретні причини й характер прояву похибок дуже різноманітні.

Відповідно їх класифікують за багатьма критеріями.

За **способом вираження** виділяють абсолютні та відносні похибки.

*Абсолютна похибка виміру* – похибка виміру, виражена в одиницях вимірюваної величини.

*Відносна похибка виміру* – відношення абсолютної похибки до справжнього значення вимірюваної величини.

За **характером прояву** розрізняють систематичні та випадкові похибки.

*Систематична похибка виміру* – це похибка виміру, що залишається постійною або закономірно змінюється за повторних вимірів однієї й тієї ж фізичної величини. Залежно від характеру зміни систематичні похибки поділяють на постійні, пропорційні і змінювані за складним законом.

*Постійні похибки* тривалий час зберігають своє значення, зокрема впродовж усього періоду виконання вимірів. Вони зустрічаються найчастіше. Прикладом такого виду систематичної похибки може бути стале, відмінне від нуля значення холостого досліду.

*Пропорційні похибки* змінюються пропорційно значенню вимірюваної величини.

*Періодичні похибки* – це періодична функція часу або функція переміщення показника вимірювального приладу.

*Похибки, змінювані за складним законом,* є результат спільної дії декількох систематичних похибок.

Залежно від причин виникнення систематичні похибки поділяють на інструментальні, похибки методу вимірів, суб'єктивні, похибки, пов’язані з недотриманням установлених умов вимірів.

*Інструментальні (апаратурні) похибки* вимірів обумовлені похибками використовуваних засобів виміру. Вони виникають унаслідок зносу деталей і приладу в цілому, зайвого тертя в механізмі приладу, неточного нанесення штрихів у процесі калібрування, через невідповідність дійсного й номінального значень міри і т. д. Останніми роками до цього виду похибок стали відносити також і випадкову складову похибки, властиву засобу виміру.

*Похибки методу вимірів (теоретичні)* обумовлені недосконалістю застосовуваного методу вимірів. Вони становлять наслідок спрощених уявлень про явища й ефекти, що лежать в основі вимірів.

*Суб'єктивні похибки вимірів* (особисті, особиста різниця) зумовлені індивідуальними особливостями аналітика.

Похибки вимірів, пов’язані із зміною умов вимірів, виникають унаслідок неврахованого або недостатньо врахованого впливу тієї чи іншої величини (температура, тиск, вологість повітря, напруженість магнітного поля, вібрації та ін.), неправильного встановлення засобів вимірів тощо.

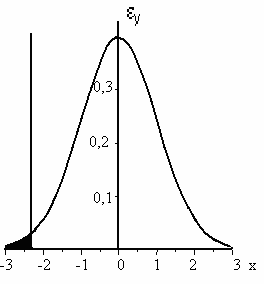
*Випадкова похибка виміру* – це похибка виміру, яка змінюється випадковим чином (за знаком і значенням) за повторних вимірів однієї й тієї ж величини. Випадкові похибки неминучі й неусувні, вони завжди наявні в результатах вимірів. Такі похибки спричиняють розсіяння числових значень вимірюваної величини (відмінність їх в останніх значущих цифрах) за багаторазового й досить точного її виміру за незмінних умов.

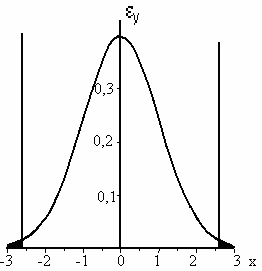
За **умовами виміру величини** виділяють статичні й динамічні похибки. *Статичні похибки* відповідають умовам статичних вимірів, *динамічні* – умовам динамічних вимірів. Залежно від умов вимірів розглядають також основні і додаткові похибки.

Крім того, виділяють **грубу похибку виміру** – ту, що істотно перевищує очікувану за певних умов.

# ОБРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

В аналітичній хімії передбачено, що закон, який описує всі значення випадкової похибки, отримані для нескінченної кількості паралельних вимірів – це нормальний закон розподілу (рис. 2.). За кількості паралельних вимірів *n*> 10 доцільно перевірити це припущення.

Обробку експериментальних даних, отриманих у ході паралельних вимірів однієї й тієї ж концентрації аналіту в однакових умовах, проводять на основі статистичних гіпотез. Застосування статистичної гіпотези передбачає порівняння величин, розрахованих за певним рівнянням із використанням наявних експериментальних значень, із табличними даними. Якщо розраховане значення менше табличного, роблять висновок про правильність зробленого припущення, якщо більше, то його відкидають. Табличне значення встановлено для заданого рівня довірчої ймовірності й деякої кількості степенів вільності.



*а б*

**Рис. 2. Графічний вигляд нормального закону розподілу:**

*а* – 95%-й квантиль для односторонньої межі; *б* – 95%-й інтерквантильний проміжок для двосторонньої межі

Для оцінювання величини розкиду експериментальних даних відносно центру застосовують квантильні оцінки ширини розподілу. Нормована площа під кривою, яка описує нормальний закон розподілу, дорівнює одиниці, оскільки відображає ймовірність настання всіх можливих подій. Цю площу можна розділити на частини вертикальними лініями, абсциси яких називають квантилями. Наприклад, вертикальна лінія на рис. 2, *а* – це 95%-й квантиль, оскільки площа під кривою зліва від неї становить 5% від усієї площі, а праворуч

– 95%. Якщо взяти дві вертикальні лінії, інтервал значень між якими називають інтерквантильним проміжком, відповідні, наприклад, 2.5%-му й 97.5%-му квантилям (рис. 2, *б*), то площа між ними становитиме 95% від усієї площі під нормальною кривою розподілу.

Для односторонніх інтервалів процентиль *t*-розподілу *p* дорівнює 1 – , для двосторонніх – *p* = 1 – */*2. В обох випадках рівень довірчої ймовірності дорівнює 1 – . В аналітичній хімії приймають, що  = 0.05. Це означає, що існує 5%-на ймовірність того, що висновок, зроблений за допомогою статистичної гіпотези, помилковий.

# ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ СТЕПЕНІВ ВІЛЬНОСТІ

Під кількістю степенів вільності розуміють дані, на основі яких можна зробити висновок про вигляд математичної моделі й можливу величину похибки. Очевидно, що для функції *y = ax* необхідно провести як мінімум один експеримент, щоб визначити параметр *a*. Однак із цього одного експерименту не можна оцінити величину похибки. Проведення двох вимірів дасть можливість це зробити, однак така оцінка буде дуже неточна. Чим більше вимірів, тим більш точна буде оцінка. Наявність додаткових вимірів, крім того, дозволить зробити висновок про те, чи можна описати спостережувану залежність наведеною вище математичною моделлю.

Кількість степенів вільності для різних варіантів виконання хімічного експерименту, пов'язаного з проведенням низки паралельних вимірів, розраховують як описано нижче.

Кількість степенів вільності для однієї серії дослідів, у якій проведено *n*

паралельних вимірів, дорівнює

*n* = *n* –1 (2)

Для даних, наведених у табл. 2., кількість степенів вільності для першої серії вимірів дорівнює *n* = 3 – 1 = 2. Аналогічний результат буде і для кожної наступної серії.

Для експерименту з *k* серій, у кожній із яких виконано *nk* паралельних визначень, кількість степенів вільності складає

*k*

*n,k* =

(*nk* 1

 1) , (3)

Якщо в семи серіях експериментів було виконано по 5 паралельних вимірів, то кількість степенів вільності *n,k* = 7(5 – 1) = 28. Якщо ж у трьох із семи серій експериментів було виконано по 6 паралельних вимірів, а в інших чотирьох – по 2, то кількість степенів вільності *n,k* = 3(6 – 1) + 4(2 – 1) = 19.

# СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ВИХІДНИХ ДАНИХ

Статистичну обробку починають із розрахунку середнього арифметичного

(середнього значення)

*X k* для *k*-ї серії експериментальних даних за формулою

*n*

 *x k* ,*i*

*X k*  *i* 1 , (4)

*nk*

де *xk,i* – результат *i*-го виміру *k*-ї серії вимірів.

Передбачено, що середнє значення є оцінка справжнього значення, оскільки випадкові похибки, які мають різні знаки, компенсують одна одну. Очевидно, що чим більша кількість вимірів проведена, тим точніше це припущення.

Потім для *k*-ї серії розраховують стандартне відхилення *sk*:

*s k* 

. (5)

Стандартне відхилення – це оцінка можливого ступеня відхилення отриманих експериментальних даних від справжнього значення, воно обумовлене наявністю випадкової похибки.

*n*



*i* 1

( *x k* ,*i*

* *X*

*k* )

2

*n k*  1

Розраховані значення середнього і стандартного відхилень доцільно включити в таблицю, наприклад табл. 4.

Таблиця 4. Результати титриметричного визначення концентрації оцтової кислоти

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Експериментальні дані | | | Кількість вимірів | Середнє  арифметичне | Стандартне  відхилення |
| *V*1, мл | *V*2, мл | *V*3, мл | *n* | *X* | *s* |
| 12.20 | 12.10 | 12.30 | 3 | 12.20 | 0.11 |

Для всіх *k* серій вимірів повне стандартне відхилення розраховують за формулою

*s*  . (6)

 *s*

1

*k*

 ( *n*  1) 

2

*k*

*k*

 ( *nk*  1)

1

*k*

У процесі виконання розрахунків необхідно всі проміжні обчислення проводити з точністю, у кілька разів вищою, ніж вихідний результат. При цьому точність подання кінцевого результату не повинна бути вища, ніж точність вимірюваної величини.

# ВИКЛЮЧЕННЯ ГРУБИХ ПОМИЛОК

Результати, отримані в ході аналізу зразків, що містять однакову концентрацію аналіту, одним і тим же аналітиком в однакових умовах, не повинні істотно відрізнятися один від одного. Якщо це не так, то вони можуть містити грубі помилки. До них належать, наприклад, дані, отримані за порушення методики проведення аналізу (неправильно взято аліквоти, зразок не повністю розчинений і под.). Якщо грубу помилку виявлено, то дані необхідно виключити з подальших розрахунків.

Для перевірки припущення про наявність грубої помилки за кількості паралельних вимірів *n*<10 можна застосовувати статистичну гіпотезу, яка ґрунтується на *Q*-критерії. Для цього розраховують значення *Q*1 і *Qn* за рівняннями

*х*1  *х*2 *х*1  *хn*

*хn*  *хn*1

*хn*  *х*1

*Q*1 

, *Qn* 

, (7)

де значення *xi* – значення, упорядковані за зростанням.

Результат порівнюють із граничним значенням *Q*гр, наведеним у табл. Д. 1. Якщо

*Q*1 або *Qn* більше *Q*гр,, то перевірений результат вважають грубою помилкою.

Як правило, на практиці виключення одного значення із трьох робить отримане середнє недостовірним. Для уникнення цього, в разі, якщо за рівнянням (7) установлено наявність грубої помилки, необхідно виконати ще одне визначення й розглянути чотири значення.

*Приклад 2*. У випадку визначення NaOH методом ацидометрії на титрування аліквоти об'ємом 15 мл у трьох паралельних вимірах пішло 6.3, 7.0 та 7.1 мл титранту. Визначити, чи було допущено грубу помилку.

Можна припустити, що перше значення є грубою помилкою. Для перевірки цього припущення провели четверте титрування, у якому об’єм титранту становить 7.0 мл. Розрахункове значення *Q*-критерію дорівнює

*Q*  7.0  6.3  0.875 ***.***

1 7.1 6.3

Оскільки табличне значення *Q*гр = 0.76, можна зробити висновок, що результат

6.3 мл – це груба помилка і подальші розрахунки необхідно проводити без нього.

Якщо кількість вимірів *n≥*10, то для визначення наявності у вибірці грубої помилки застосовують -критерій. Граничне значення гр встановлюють за формулою:

фгр 

*xm*  *Х*

*s*

(8)

де *xm* - максимальне або мінімальне значення з вибірки.

Результат порівнюють із значенням гр, наведеним у табл. Д. 2. Якщо розраховане значення гр більше, ніж табличне, то *xm* є груба помилка і її необхідно виключити з подальших розрахунків.

# ВИЗНАЧЕННЯ РІВНОТОЧНИХ ДАНИХ

Спільна статистична обробка даних, отриманих для однієї й тієї ж концентрації аналіту в однакових умовах у декількох серіях експериментів одним або кількома експериментаторами, можлива, як правило, тільки в тому випадку,

якщо вони мають порівнянну точність, тобто експериментальні дані є рівноточні. З метою встановлення правдивості цього твердження застосовують декілька статистичних гіпотез.

У випадку розгляду двох серій паралельних вимірів застосовують *критерій Фішера* (табл. Д. 3):

2

*s*



*F* 1 . (9)

2

*s*

2

Якщо розраховане значення *F* менше табличного, то дані є рівноточні.

*Приклад 3*. У ході визначення Fe2+ у контрольному розчині солі Мора прямим окисно-відновним титруванням 0.1094 М розчином перманганату калію (1/5 KMnO4) і 0.1000 М розчином біхромату калію (1/6 K2Cr2O7) було отримано деякі результати (табл. 5). Під час проведення аналізу виданий зразок було поміщено в мірну колбу на 100 мл, із якої відібрано аліквоти, що дорівнюють 15 мл, і відтитровано розчин. Визначити, чи є отримані дані рівноточні.

Таблиця 5. Визначення Fe2+ у контрольному розчині солі Мора прямим окисно-відновним титруванням

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Титрант | V1, мл | V2, мл | V3, мл | *X* | *s* |
| KMnO4 | 5.0 | 5.0 | 5.1 | 5.03 | 0.06 |
| K2Cr2O7 | 5.4 | 5.6 | 5.7 | 5.57 | 0.15 |

Перевірка за *Q*-критерієм показує, що грубі помилки відсутні. Розраховані значення середніх та стандартних відхилень наведено в табл. 5. Уміст заліза в контрольному розчині обчислимо за такими формулами:

* для перманганатометрії:

*C*( 15 KMnO4) *V*  *M* (Fe2 ) *V*м.к.

2 

*m*(Fe ) 

* для біхроматометрії

*C*( 16 K2Cr2O7 ) *V*  *M* (Fe2 ) *V*м.к.

*m*(Fe2 ) 

;

*V*ал 1000

,

*V*ал 1000

де *V*м.к – об’єм мірної колби, мл; *V*ал – об’єм аліквоти, мл.

Стандартні відхилення, виражені в одиницях маси, дорівнюють 0.0025 і 0.0056 г для перманганатометрії та біхроматометрії відповідно. Далі порівняємо стандартні відхилення за *F*-критерієм:

0.00562

*F* 

0.00252

 5.02 .

Оскільки υ1 = υ2 *=* 3 – 1 = 2, табличне значення *F* =19.2, тобто більше, ніж розрахункове. Отже, дві вибірки є рівноточні.

*Критерій Бартлета* застосовують у тому випадку, коли проведено *k* серій хімічного аналізу одного й того ж зразка, у кожній із яких виконано різну кількість паралельних визначень *nk*. Критерій Бартлета із задовільною точністю застосовують для вибірок обсягом *nk* 6. Для визначення того, чи є одна із серій

нерівноточна, обчислюють значення *sk* і *n,k*, а потім – значення повного стандартного відхилення. За допомогою цих даних розраховують параметри *B* і *C*:

*k*

*B* = 2.3[*n,k*lg*s*2*n,k*  (  н*k* lg*sk*2)], (10)

1

*C* = 1 +

1 ( *k* 1  1 ). (11)

3(*k*  1)



1. н*k*

н*n*,*k*

Якщо 2 < *B/C*, де 2 – критерій Пірсона (табл. Д. 4) для *p* = 0.95 і кількість степенів вільності υ*k = k* – 1, то гіпотезу про рівноточність вважають правдивою, якщо ні, то з подальшої обробки виключають серію, яка має найбільше стандартне відхилення.

У тих випадках, коли кількість паралельних визначень в усіх серіях однакова, для виявлення рівноточних даних застосовують *критерій Кохрена*. Спочатку для кожної серії обчислюють стандартне відхилення *sk* і знаходять найбільше з них *s*max. Далі визначають відношення найбільшої оцінки до суми всіх оцінок *sk*:

*s*2

*G*  max . (12)

*p k*

2

*s*



*j*  1 *j*

Критичні значення критерію Кохрена наведено в табл. Д. 5. Якщо табличне значення менше розрахункового, то серію експериментів, якій відповідає *s*max, виключають із подальшого розгляду.

*Приклад 4.* У процесі визначення загальної лужності води прямим ацидометричним титруванням були отримані деякі дані (див. табл. 2). Можна припустити, що сьома серія не є рівноточна іншим. Для перевірки цього припущення застосуємо критерій Кохрена:

*G*  0.402

*p* 0.062  0.062  0.062  0.252  0.122  0.212  0.402  0.062

 0.16  0.54 .

0.30

Оскільки для восьми серій дослідів значення критерію Кохрена в табл. Д. 5 відсутні, розрахуємо наближене значення, виходячи з наявних найближчих. Візьмемо значення для серій дослідів із семи та десяти дослідів:

*G*8  *G*7

 *G*10  *G*7

10  7

 0.522 .

Як бачимо, табличне значення більше розрахованого, отже, сьому серію

необхідно розглядати окремо від інших.

# РОЗРАХУНОК ДОВІРЧОГО ІНТЕРВАЛУ Й ПОДАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Розрахунок інтервалу, у якому з рівнем довірчої ймовірності 1  міститься справжнє значення , проводять за формулою

*X + ∆Х >*  *> X*  *∆Х*. (13)

Для визначення меж інтервалу для однієї серії паралельних вимірів застосовують формулу

*X*  *t p*,н *s* , (14)

*n*

де *tp,* – табличне значення критерію Стьюдента (табл. Д. 6).

Для визначення меж довірчого інтервалу для експерименту з декількох серій паралельних вимірів використовують повне стандартне відхилення й середнє арифметичне, розраховане з даних для всіх серій. Кількість степенів вільності обчислюють за рівнянням (2), а величину *p* беруть такою, що дорівнює 0.95

*Приклад 5.* У ході визначення загальної лужності води прямим ацидометричним титруванням було отримано дані, наведені в табл. 3. Визначити межі довірчого інтервалу, спираючись на попередню обробку експериментальних даних (див. прикл. 1).

Розраховуємо середнє із 21 значення. Воно дорівнює 9.76 мл. Повне стандартне відхилення знаходимо за рівнянням (5), у якому знаменник дробу дорівнює 21 - 7 = 14. Відхилення складає 0.14 мл. Коефіцієнт Стьюдента для рівня довірчої ймовірності 0.05 і кількості степенів вільності 14 дорівнює 2.15. Таким чином, довірчий інтервал дорівнює

21

*∆Х* =

2.15 0.14  0.06

мл.

Після проведеної статистичної обробки кінцевий результат подають у вигляді табл. 6.

Таблиця 6. Результати визначення

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Кількість  серій | Кількість вимірів  у серії | Середнє  арифметичне | Стандартне  відхилення | Межі довірчого  інтервалу |
| *k* | *nk* | *Х* | *s* | *Х*  *Х* |

Якщо було виконано одну серію дослідів, то в табл. 6 можна навести всі експериментальні дані.

*Приклад 6.* Подати остаточний результат визначення лужності води, виходячи з даних, наведених у прикл. 1 і 5.

Розрахуємо загальну лужність за формулою

*C*(HCO)  *C*(HCl) *V* 1000 , ммоль/л;

3 100

*C*(HCO)  0.1 9.76 1000

= 9.76 ммоль/л.

3 100

*∆Х* = 0.06 ммоль/л.

Остаточний результат подамо у вигляді табл. 7:

Таблиця 7. Результати визначення загальної лужності водопровідної води

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *k* | *n* | *X ,* ммоль/л | *s,* ммоль/л | *X*  *∆Х,* ммоль/л |
| 8 | 3 | 9.76 | 0.14 | 9.760.06 |

# ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ, ОТРИМАНИХ ДЕКІЛЬКОМА МЕТОДАМИ

В аналітичній практиці часто доводиться порівнювати між собою результати, отримані за допомогою декількох методик. Це в першу чергу стосується випадків, коли порівнюють результати застосування стандартної й нової методик. Крім того, порівняння результатів двох методик дозволяє оцінити наявність систематичної похибки в одній із них. Для порівняння двох результатів застосовують статистику

*X* 1 *X* 2

(*n* 1) *s*2  (*n* 1) *s*2

1

1

2

*n*  *n*  2

2 (

1 1

 )

1 2

*n n*

1 2

*t*  . (15)

Два середні збігаються, якщо значення *t* менше (або дорівнює) значення коефіцієнта Стьюдента з кількістю степенів вільності =*n*1+*n*22 і довірчої ймовірності

0.95. Цю статистику можна застосовувати тільки тоді, коли результати є рівноточні.

*Приклад 7*. У ході визначення Fe2+ у контрольному розчині солі Мора прямим окисно-відновним титруванням біхроматом калію і перманганатом калію було отримано деякі результати (див. прикл. 3). Порівняти результати визначення заліза двома методами між собою.

Під час дослідження отримаємо таке:

* у випадку перманганатометричного визначення:

*m*(Fe2 )  0.10945.0356100  0.2054 г; 151000

* у разі біхроматометричного визначення:

*m*(Fe2 )  0.10005.57 56100  0.2079 г.

151000

Порівняємо між собою середні, отримані перманганатометрично і біхроматометрично, за *t*-критерієм:

*t*   0.706 .

0.2054  0.2079

(3 1)  0.00252  (3 1)  0.00562  (1  1)

3  3  2

3 3

Довідникове значення критерію Стьюдента для кількості степенів вільності

=3+3–2=4 і *p*=0.95 дорівнює 2.78, що більше, ніж розраховане. Таким чином, обидва методи дають порівнянний результат.

# ГРАДУЮВАЛЬНА ЗАЛЕЖНІСТЬ

Величина аналітичного сигналу зумовлена багатьма параметрами (матричний склад речовини, випадковий шум приладу і т. д.), тому необхідно забезпечити встановлення таких умов проведення досліду, щоб впливом усіх чинників, що заважають, крім концентрації аналіту, можна було знехтувати. Для побудови графіка залежності, описуваної рівнянням (1), використовують стандартні зразки, які є низкою різних концентрацій аналіту в одній і тій же матриці. Усі можливі домішки, що впливають на хід аналізу, мають бути присутні в кількостях, що не впливають на точність визначення аналіту в зразку.

Область функції відгуку, який вибирає аналітик для оцінки вмісту речовини в пробі, називають градуювальною кривою (див. рис. 1). Бажано, щоб вона була лінійна. У цьому випадку говорять про лінійне калібрування, описуване рівнянням

*y = a + bx*, (16)

де *b* – нахил градуювальної залежності; *а* – відрізок, що відсікається на осі ординат.

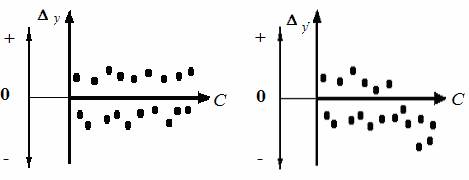
Ідеальний градуювальний графік повинен проходити через початок координат, тобто за концентрації аналіту, яка дорівнює нулю, аналітичний сигнал має бути незначущий. Це означає, що інструментальні й експериментальні фонові шуми, так само як і інші випадкові впливи, дорівнюють нулю:

*y = bx*. (17)

На практиці попередній розрахунок проводять, виходячи з припущення, що коефіцієнт *a* значущий, якщо не встановлено протилежне, а потім перевіряють правильність цього припущення.

Для оцінки меж придатності лінійної моделі необхідно побудувати градуювальний графік. Висновок про наявність лінійної залежності можна зробити на основі простого зорового сприйняття поля експериментальних точок: якщо вони групуються рівномірно відносно деякої прямої, така залежність існує. Більш точний є метод дослідження залишків. Зокрема, залишок – це різниця ∆*y* між спостережуваним аналітичним сигналом і розрахунковим значенням *y*т, отриманим за припущення, що всі точки лежать на одній прямій.

Якщо гіпотеза про відповідність експериментальних даних лінійному калібруванню виконується, то залежність ∆*y* від *С* має вигляд горизонтальної смуги, розподіленої біля нуля (рис. 3, *а*). Якщо ж не виконується, то має місце випадок, показаний на рис. 3, *б*.



*а б*

**Рис. 3. Залишки *∆y*, відкладені відносно незалежно змінної *С*:**

*а –* рівномірне розподілення; *б –* нерівномірне розподілення

Для обробки даних лінійного калібрування застосовують метод найменших квадратів (МНК). Одним із параметрів, який визначають за допомогою цього методу, є коефіцієнт кореляції *r*. У математичній статистиці його застосовують, оцінюючи міру лінійності градуювального графіка. Чим ближча величина *r* до значення ±1, тим точніший опис спостережуваної залежності лінійною функцією. Якщо *r* = 0, то будь-яка кореляція між *x* і *y* відсутня.

Застосування коефіцієнта *r* як міри спільної зміни залежної та незалежної змінних у процесі опису градуювальних залежностей в аналітичній хімії

недоцільне, оскільки *r* відносять тільки до статистичних, а не до функціональних залежностей.

Застосовуючи обробку результатів за МНК, пряму лінію проводять так, щоб сума квадратів відхилень розрахункових значень *yjт* від експериментальних значень *yj*е була мінімальна для всієї кількості дослідів, тобто значення функції

2=*j*(*yj*е - *yjт*)2 було мінімальним для всіх дослідів.

Параметри а і *b* спочатку необхідно визначити приблизно безпосередньо з графіка, а потім порівняти отримані значення із даними, розрахованими із застосуванням МНК. Якщо розбіжність велика, то це свідчить про помилку в розрахунку за МНК.

# ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГРАДУЮВАЛЬНОГО ГРАФІКА, ЩО НЕ ПРОХОДИТЬ ЧЕРЕЗ ПОЧАТОК КООРДИНАТ

Коефіцієнти *a* і *b* в рівнянні (16) у разі застосування МНК розраховують за формулами



де *m* – кількість стандартних зразків, використовуваних для побудови градуювального графіка.

Кількість степенів вільності в цьому випадку дорівнює =*m*–2, оскільки для визначення параметрів градуювальної залежності потрібно як мінімум два виміри. *Приклад 8.* У процесі флуорометричного визначення родаміну 6Ж було отримано деякі дані (табл. 8). Указана кількість речовини міститься в колбі на

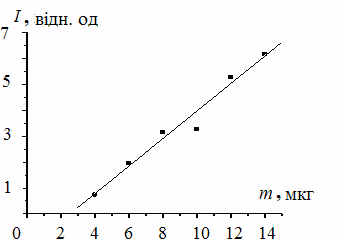
25 мл. Знайти параметри градуювального графіка. Таблиця 8. Визначення родаміну 6Ж

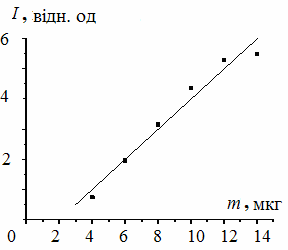
|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *j* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| *m*, мкг | 4.0 | 6.0 | 8.0 | 10.0 | 12.0 | 14.0 |
| *I*, відн. од. | 0.75 | 1.96 | 3.15 | 3.37 | 5.28 | 6.17 |

Зобразимо початкові дані у вигляді графіка (рис. 4, *а*). Як видно, залежність практично лінійна. Під час розрахунку параметрів градуювального графіка зручніше використати дані про масу речовини в мірній колбі, а не про концентрацію. Перерахунок у концентрацію необхідно провести після статистичної обробки результатів.

Із даних, наведених на рис. 4, *а*, одержимо зразкові значення параметрів *b* і

*a*. Вони дорівнюють 0.5 і – 1.4 відповідно.



*а б*

**Рис. 4. Графічні залежності інтенсивності люмінесценції від умісту родаміну 6Ж в розчині, отримані двома експериментаторами (*а* і *б* )**

Для отримання параметрів градуювального графіка за МНК розрахуємо допоміжні величини.



Як бачимо, дані, отримані із застосуванням МНК, близькі до значень, одержаних безпосередньо з графіка. Для перерахунку в концентрацію застосуємо рівнянням:

*b*'  *V*м.к.  *b*  25 0.533  13.325 .

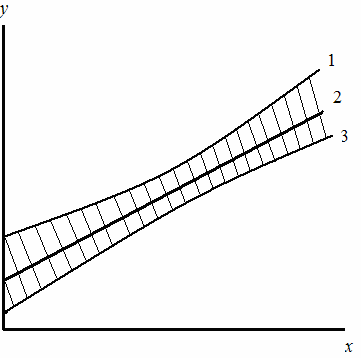
Таким чином, рівняння градуювальної залежності має вигляд

*y* = – 1.346 + 13.32 *x.*

# ВИКЛЮЧЕННЯ ГРУБИХ ПОМИЛОК У ПРОЦЕСІ ПОБУДОВИ

**ГРАДУЮВАЛЬНОГО ГРАФІКА**

З огляду на невизначеність, пов'язану з наявністю випадкових похибок під час проведення вимірів, градуювальну залежність можна провести декількома способами. Це означає, що для заданого рівня довірчої ймовірності експериментальні точки повинні лежати всередині деякої смуги - коридору помилок (рис. 5). Якщо одна або декілька точок опиняться поза цим інтервалом, то їх можна вважати грубими помилками.



**Рис. 5. Коридор помилок для лінії регресії *2*, (лінії *1, 3* – межі коридора)**

Для оцінки того, чи є значення функції відгуку в точці з концентрацією *x*0

грубою помилкою, розраховують дисперсію відтворюваність оцінних значень функції відгуку:

*s*2(*Y* ) , що характеризує



де *sy* – стандартне відхилення точок від знайденої залежності, яке також має назву

залишкової суми відхилень або дисперсії адекватності:

*y* . (21)

*j*1

 [ *y* (*a**bx* )]2

*m*

*j*

*j*

*m*2

*s*



де *yj* – експериментально встановлені значення аналітичного сигналу для *j*-го стандартного зразка; *a* + *bxj* – значення аналітичного сигналу, розраховані за рівнянням (16).

Далі розраховують межі довірчого інтервалу:

*yi*  *tp*,н *s*(*Y* ) , (22)

де *tp,* – коефіцієнт Стьюдента.

Якщо одне із значень знаходиться поза цією межею, то це груба помилка і її необхідно виключити. Після цього розрахунок коефіцієнтів градуювального графіка необхідно повторити.

*Приклад 9.* У процесі виявлення грубих помилок у ході флуориметричного визначення родаміну 6Ж (див. прикл. 7), можна припустити, що*:*



Оскільки інтервал, у якому знаходиться останнє значення, дорівнює *С*=3.980.41, то нижня межа довірчого інтервалу складає 3.57 і, отже, це значення є грубою помилкою.



# ОЦІНКА СТАНДАРТНИХ ВІДХИЛЕНЬ РОЗРАХОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ

# ГРАДУЮВАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ

Стандартні відхилення розрахованих параметрів градуювальної залежності

*a* і *b* обчислюють за формулами

*s* 

*y*

*ms*2

*m*  *x*2(  *x* )2

*m*

*m*

*j* 1 *j j* 1 *j*

*b* , (23)

*s*  *sb*

*a*

. (24)

Межі довірчих інтервалів розрахованих параметрів *a* і *b* знаходять за рівняннями

*j* 1 *j m*

 *x*2

*m*

*Cb = ± t p,**·sb*, (25)

*Ca = ± t p,* *·sa.* (26)

де *tp,* – коефіцієнт Стьюдента для рівня довірчої ймовірності 0.95 і кількості степенів вільності  =*m – 2.*

Якщо параметр *a* менший, ніж величина довірчого інтервалу *Ca*, то вважають, що градуювальна залежність проходить через початок координат і описана рівнянням (17), проте перерахунок параметрів не роблять.

У процесі опису результатів, отриманих за допомогою лінійних градуювальних залежностей, у звіт доцільно включати такі характеристики:

* розраховані параметри *a* і *b* і їх стандартні відхилення;
* стандартне відхилення значень від знайденої залежності. Остаточний результат необхідно подати в такому вигляді:

*y = (a**Ca)+(b**Cb)x.* (27)

*Приклад 10*. У ході флуорометричного визначення родаміну 6Ж було отримано дані, наведені в табл. 9. Визначити межі довірчих інтервалів параметрів *a* і *b*.

Таблиця 9. Дані для визначення родаміну 6Ж

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *j* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| *m*, мкг | 4.0 | 6.0 | 8.0 | 10.0 | 12.0 |
| *I*, відн. од. | 0.75 | 1.96 | 3.15 | 4.35 | 5.28 |

Дані для цих точок подано на рис. 4, *б* (за винятком останньої точки).

Градуювальний графік має лінійний вигляд. Значення *a* і *b* можна обчислити:



*sb* 

 0.050 ;

*sa*  0.016

 0.421.

Коефіцієнт Стьюдента для  = 5 – 2 = 3 степенів вільності й рівня довірчої ймовірності 0.95 дорівнює 3.18. Отже, довірчі інтервали для коефіцієнтів, знайдених за допомогою МНК, такі:

50.099

53601600

360

5

*Cb =* 3.18·0.050 = 0.158; *Ca* = 3.18·0.421 *=* 1,34*.*

Для перерахунку в концентрацію застосуємо рівняння

*b*'  *V*м.к.  *b* 

25  0.573 

14.33 ,

*Сb*' *V*м.к*Сb*  250.158 3.95.

Остаточний розв’язок має вигляд *y* = (*–*1.48  0.43) + (14.33  3.95*)x*.

# ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ АНАЛІТУ В ПРОБІ ЗА ГРАДУЮВАЛЬНИМ ГРАФІКОМ

Межі довірчого інтервалу для певного рівня довірчої ймовірності, у які потрапляє розраховане значення концентрації аналіту в пробі, визначають за формулою



де *tp*, – табличне значення критерію Стьюдента для рівня довірчої ймовірності

0.95 і кількості степенів вільності =*m*2; *y*зр – виміряне значення аналітичного сигналу для аналіту в досліджуваному зразку.

Результат хімічного аналізу, отриманий за допомогою МНК, слід наводити як розраховане значення незалежної змінної

*y*зp  *a*

*x*  (29)

*b*

з указуванням меж довірчого інтервалу.

*Приклад 11.* Під час флуорометричного визначення родаміну 6Ж було отримано градуювальний графік із деякими параметрами (див. прикл. 8). Після цього було встановлено значення аналітичного сигналу для зразка. Воно дорівнювало 3.61. Визначити вміст родаміну 6Ж в зразку.

Для кількості степенів вільності =5-2=3 і рівня довірчої ймовірності 0.95

коефіцієнт Стьюдента дорівнює *tp,*v= 3.18:

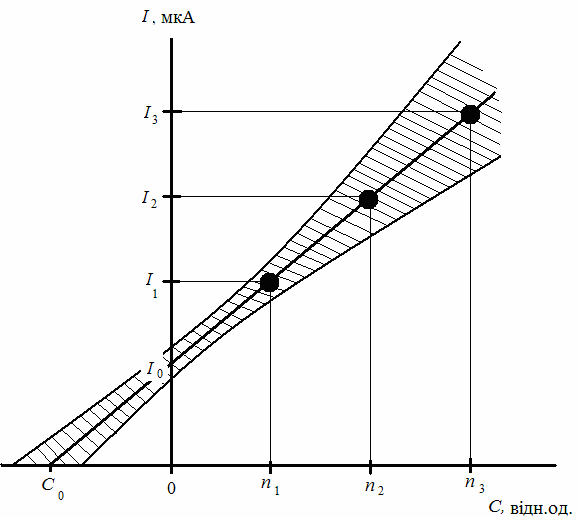


Результат аналізу *x* = 8.93 0.61 мкг.

# МЕТОД СТАНДАРТНИХ ДОДАТКІВ

У деяких випадках, наприклад у методі полуменевої фотометрії, на величину аналітичного сигналу впливає наявність у розчині домішок, склад і концентрація яких невідома. Для обліку такого впливу застосовують метод стандартних додатків. У цьому методі додають певну кількість стандартного розчину з відомою концентрацією до зразка і вимірюють відгук приладу як функцію від кількості доданого стандартного розчину. Суть методу ілюструє рис. 6.





**Рис. 6. Градуювальна залежність, отримана за методом стандартних додатків**

*Приклад 12*. У процесі полуменево-фотометричного визначення іонів натрію в розчині за методом стандартних додатків було отримано значення, подані в табл. 10. Визначити масу натрію в розчині.

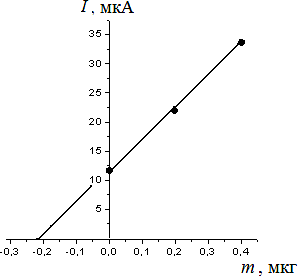
Таблиця 10. Дані для визначення маси натрію в розчині

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Маса натрію *m*(Na+), доданого  до розчину, мкг | 0 | 0.2 | 0.4 |
| *I*, мкА | 12 | 22 | 34 |

Відповідно до отриманих даних будуємо градуювальний графік (рис. 7), із якого випливає, що *а* 12 мкА, а *b*  57 мкА/мкг.

Виходячи з наявних експериментальних даних, визначимо параметри градуювального графіка:





**Рис. 7. Градуювальна залежність, отримана в процесі визначення маси натрію за методом додатків**

Отриманий результат є абсурдний, оскільки межі довірчого інтервалу перевищують саму вимірювану величину. При цьому експеримент проведено досить точно, оскільки експериментальні точки лежать практично на прямій. Цей результат підтверджує правдивість твердження про те, що розрахунок за невеликою кількістю експериментальних точок призводить до істотних похибок у обчисленні шуканої величини.

# СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Аналитическая химия. Проблемы и подходы [Текст]: в 2 т. /Р. Кельнер, Ж.-М. Мерме, М. Отто, М. Видмер. – М.: АСТ: Мир, 2004. – Т. 2. – 608 с. – ( Сер.

«Лучший зарубежный учебник»).

Ананьев, В.А. Анализ экспериментальных данных [Текст]: учеб. пособие: в

1. ч. / В.А. Ананьев. – Кемерово: ГОУ ВПО «Кемеровский госуниверситет», 2008.

–Ч.1. – 92 с.

Дерфель, К. Статистика в аналитической химии [Текст] / К. Дерфель. –

М.: Мир, 1994. – 266 с.

Основы аналитической химии [Текст] в 2 кн. Кн. 1. Общие вопросы. Методы разделения. / под ред. Ю.А. Золотова. – М.: Высш. школа, 2002. – 351 с. – (Сер. «Классический университетский учебник»).

Отто, М. Современные методы аналитической химии [Текст] / М. Отто. –

М.: Техносфера, 2006. – 544 с. – (Сер. «Мир химии»).

Предсталение результатов химического анализа (рекомендации IUPAC 1994 г.) [Текст] //Журн. аналит. химии. – 1998. – Т. 53, № 9. – С. 999–1008.

Систематические и случайные погрешности химического анализа [Текст] /

под ред. М.С. Черновьянц. – М.: ИКЦ «Академкнига». 2004. – 157 с.

Чарыков, А.К. Математическая обработка результатов химического анализа

[Текст] /А.К. Чарыков. – Л.: Химия, 1984. – 168 с.

Шараф, М.А. Хемометрика. [Текст] / М.А. Шараф, Д.Л. Иллмэн, Б.Р. Ковальски. – Л.: Химия, 1989. – 269 с.

# ДОДАТОК

Таблиця Д. 1. Числові значення *Q*-критерію

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *n* | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| *Q* | 0.94 | 0.76 | 0.64 | 0.56 | 0.51 | 0.47 | 0.44 | 0.41 |

Таблиця Д. 2. Значення *tn* розподілу

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *n* | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| *tn* | 2.414 | 2.638 | 2.779 | 2.880 | 2.958 |

Таблиця Д. 3. *F*-критерій для довірчої ймовірності 0.95

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 12 |
| 1 | 164.4 | 199.5 | 215.7 | 224.6 | 230.2 | 234.0 | 244.9 |
| 2 | 18.5 | 19.2 | 19.2 | 19.3 | 19.3 | 19.3 | 19.4 |
| 3 | 10.1 | 9.6 | 9.3 | 9.1 | 9.0 | 8.9 | 8.7 |
| 4 | 7.7 | 6.9 | 6.6 | 6.4 | 6.3 | 6.2 | 5.9 |
| 5 | 6.6 | 5.8 | 5.4 | 5.2 | 5.1 | 5.0 | 4.7 |

Таблиця Д. 4. Критерій Пірсона 2 для рівня значущості  = 0.05

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| χ2 | 0.0039 | 0.10 | 0.35 | 0.70 | 1.1 | 1.6 | 2.1 | 3.9 | 7.3 | 10.8 | 18.5 |

Таблиця Д. 5. Значення критерію Кохрена для рівня значущості  = 0.05

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Кількість дослідів у серії, *n* | Кількість степенів вільності  = *k* – 1 | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | 0.998 | 0.975 | 0.940 | 0.906 | 0.877 | 0.853 |
| 3 | 0.967 | 0.871 | 0.798 | 0.746 | 0.707 | 0.677 |
| 4 | 0.906 | 0.768 | 0.684 | 0.629 | 0.589 | 0.560 |

Таблиця Д. 6. Коефіцієнт Стьюдента *tp*, для рівня значущості  = 0.05

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 10 | 15 | 20 |  |
| *t* | 12.71 | 4.30 | 3.18 | 2.78 | 2.57 | 2.45 | 2.37 | 2.23 | 2.13 | 2.09 | 1.96 |