

## Вступ до біомедичної інженерії

У підручнику розкрито дванадцять тем з біомедичної інженерії на рівні вступу до відповідних навчальних дисциплін, які студенти з спеціальності «БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ» будуть в майбутньому більш детально вивчати на другому-третьому курсах бакалаврату при фізичному факультеті ДВНЗ «Ужгородський національний університет», кафедри квантової електроніки.

Матеріали, викладені в навчальному посібнику, можуть бути корисними для студентів із спеціалізацій «екологія навколишнього середовища», «агрономія», «мікробіологія» та «лікувальна справа».



**ШУАІБОВ Олександр Камілович**, кандидат фіз-мат наук з спеціальності «фізична електроніка, в тому числі квантова» (1987 р), старший науковий співробітник (1992 р), доктор фіз-мат наук з спеціальності «фізична електроніка» (2004 р), професор кафедри квантової електроніки (2004 р), заслужений діяч науки і техніки України (2021 р).



**Globe**  
EDIT

ШУАІБОВ, Грицак, Малініна

**Globe**  
EDIT



Олександр Камілович ШУАІБОВ · Роксолана Грицак ·  
Антоніна Малініна

## Вступ до біомедичної інженерії

**Олександр Камілович ШУАІБОВ**  
**Роксолана Грицак**  
**Антоніна Малініна**

**Вступ до біомедичної інженерії**

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

**Олександр Камілович ШУАІБОВ  
Роксолана Грицак  
Антоніна Малініна**

# **Вступ до біомедичної інженерії**

FOR AUTHOR USE ONLY

**Imprint**

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Publisher:

GlobeEdit

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom

Str. Armeneasca 28/1, office 1, Chisinau MD-2012, Republic of Moldova,  
Europe

Printed at: see last page

**ISBN: 978-620-0-64349-0**

Copyright © Олександр Камілович ШУАІБОВ, Роксолана Грицак,  
Антоніна Малініна

Copyright © 2023 Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L  
publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

Шуаїбов О.К., Грицак Р.В., Малініна А.О.

## БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ. Вступ до спеціальності



Ужгород-2023

**ШУАІБОВ О.К., ГРИЦАК Р.В., МАЛІНІНА А.О.**

**ВСТУП ДО БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

**Підручник**

УДК 621:616(075.8)

Ш 95

Шуаїбов О.К., Грицак Р.В., Малініна А.О. **Вступ до біомедичної інженерії : Підручник.** – Ужгород: ДВНЗ «Ужгородський національний університет», Видавництво «Говерла», 2023 р. – 169 с. – Іл. 43; – таблиць 3. – Укр. мовою.

У підручнику розкрито дванадцять тем з біомедичної інженерії на рівні вступу до відповідних навчальних дисциплін, які студенти з спеціальності «БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ» будуть в майбутньому більш детально вивчати на другому-третьому курсах бакалаврату при фізичному факультеті ДВНЗ «Ужгородський національний університет», кафедри квантової електроніки.

Матеріали, викладені в навчальному посібнику, можуть бути корисними для студентів із спеціалізацій «екологія навколишнього середовища», «агрономія», «мікробіологія» та «лікувальна справа».

**Рецензент:** доктор фізико-математичних наук, професор Шафраньош Іван Іванович.

**ISBN 978-620-0-64349-0**



## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
ТЕМА–1. ВСТУП ДО БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ	5
ТЕМА–2. ІНАКТИВАЦІЯ І ДЕЗІНФЕКЦІЯ ОБ’ЄКТІВ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ УЛЬТРАФІОЛЕТОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ТА ПІД ДІЄЮ ОЗОНУ	22
ТЕМА–3. УЛЬТРАФІОЛЕТОВІ ЛАМПИ І ОСВІТЛЮВАЧІ ДЛЯ ЗАСТОСУВАНЬ В БІОМЕДИЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ	41
ТЕМА-4. ГАЗОРОЗРЯДНІ УЛЬТРАФІОЛЕТОВІ ЛАМПИ НА ХЛОРИДАХ АРГОНА І КРИПТОНА	59
ТЕМА–5. ОСНОВИ СВІТЛОКУЛЬТУРИ РОСЛИН ЗАКРИТОГО ГРУНТУ	71
ТЕМА–6. ВСТУП ДО КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ І ТЕХНІКИ ЛАЗЕРІВ	88
ТЕМА–7. ОСНОВИ ЕКОЛОГІЇ ЛЮДИНИ	102
ТЕМА–8. ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ОБ’ЄКТІВ БМІ	110
ТЕМА–9. ОСНОВИ РОЗРОБОК І ЗАСТОСУВАННЯ ЛІКУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ	127
ТЕМА–10. ВСТУП У БІОМЕТРІЮ	134
ТЕМА–11. ОСНОВИ НАНОТЕХНОЛОГІЙ	142
ТЕМА–12. НАНОТЕХНОЛОГІЇ І НАНОМАШИНИ В БІОМЕДИЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ	157

## ПЕРЕДМОВА

Метою даного посібника є ознайомлення студентів з програмою спеціальності «Біомедична інженерія», навчальними предметами бакалаврату (1-4 курси), компетентностями, якими мають набути студенти після закінчення четвертого курсу, та основними сучасними напрямками в біомедичній інженерії (БМІ).

Відмінними рисами освітнього спрямування БМІ як навчальної дисципліни є:

- підвищена увага дослідників до проблеми адекватного сполучення біологічного об'єкта з технічними засобами, призначеними для знімання інформації і для адекватного впливу;
- інтеграція різноманітних галузей науки, техніки і інформатики: біології, медицини, фізики, хімії, радіотехніки та мікроелектроніки, матеріалознавства, обчислювальної техніки та інших - з метою пізнання природи здоров'я і захворювань людини;
- розуміння специфіки біологічних об'єктів та базових основ сучасних інформаційних, мікроелектронних і біологічних технологій.

Вирішальною проблемою в розробці передових медичних технологій і медичної техніки є необхідність подолання основного обмежуючого фактору, а саме – відсутності фахівців за спеціальністю БМІ. Виходячи з досвіду Європейських країн, можна стверджувати, що розвиток БМІ в Україні – є стратегічним напрямком зміцнення економіки держави, підвищення ефективності вітчизняного медичного виробництва і охорони здоров'я, відкриття принципово нової сфери наукових досліджень. Це привело до збільшення центрів з підготовки фахівців з БМІ, на основі факультетів і кафедр технічного, фізико-хімічного і медико-біологічного профілю.

Даний посібник включає передмову, дев'ять тем з основних напрямків БМІ, списку першоджерел і додатку.

Питання, що розглядаються в даному навчальному посібнику, формують в студентів-бакалаврів основу для подальшого сприйняття спеціальних навчальних дисциплін з напрямку підготовки «БМІ».

## **ТЕМА–1. ВСТУП ДО БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

Біомедична інженерія виникла на перетині точних та медико-біологічних наук як офіційна навчальна дисципліна на початку 1950-х роках. Подальша історія БМІ охоплює всі досягнення фізики, хімії, математики, інформатики, інших технічних галузей, які знайшли своє медико-біологічне застосування, особливо в ХІХ-ХХІ століттях.

Головною причиною бурхливого розвитку БМІ саме у ХХ сторіччі є поява «стандартів якості», розвиненої ринкової економіки та високі вимоги до якості і конкурентної спроможності медичних виробів і технологій. Головна ознака якості – це максимальна відповідність кінцевого результату будь-якої роботи інтересам замовника.

### **1. Сучасний стан розвитку навчального напрямку підготовки спеціалістів з біомедичної інженерії**

За кордоном, у Європі та США лікарі започаткували напрямок біомедичної інженерії, залучивши до вирішення медичних проблем провідні технічні університети. Перші заклади, де це відбулось: Інститут медичної фізики (1921), в подальшому - Інститут біофізики Макса Планка (Німеччина) та Радіо-інженерний інститут (1948, США). В подальшому більшість провідних технічних університетів світу відкрили кафедри та факультети з БМІ.

Таким чином, в Європі та США сформувався потужний рух до створення самостійної програми навчання з БМІ, яка більше не є частиною традиційних інженерних програм, а з самого початку повністю інтегрована з медициною і біологією. Сьогодні розробка матеріалів медичного призначення, виробів з них та медичної техніки, а також науково і техноємних медичних технологій є одним із основних напрямів економічної політики розвинених країн.

Реалізація цих програм потребує залучення високоосвічених фахівців, які володіють відповідним обсягом знань і навичок у галузях біології, медицини, медичної техніки, медичної електроніки, біоматеріалознавства. Це привело до створення у

США і Європі спеціальності „Біомедична інженерія” та споріднених з нею спеціалізацій (зокрема „Медична інформатика”, „Медична інженерія”, „Клінічна інженерія”). Державний департамент США із працевлаштування і зайнятості (United States Department of Labor) наводить такі цифри: „... з 2000 до 2010 року число робочих місць у сфері БМІ збільшилось на 31,4% – що вдвічі перевищило швидкість зростання робочих місць у всіх інших сферах діяльності разом узятих. Сумарне зростання числа робочих місць у інших сферах на протязі декади передбачається на рівні 15,2%”. В березні 2000 р. Рада Європи заявила, що Євросоюз має важливе завдання стати найбільш спроможною з точки зору конкуренції і динамічною економічною зоною світу. Відповідно, створення гармонізованої системи науки і освіти “Європа знань” стало суттєвим політичним наслідком економічних потреб регіону з обмеженими природними ресурсами, а також продовженням попередніх ініціатив урядів і установ, відповідальних за освіту і науку у Європі, головним чином університетів.

Перед усіма науковими і професійними товариствами в галузі БМІ а також перед Європейськими університетами, які викладають БМІ, постало питання: яким чином такі програми вплинуть на освіту в галузі БМІ і як біо-медико-інженерна спільнота зможе підтримати зміни у сфері розвитку людських ресурсів і просуванні у напрямку науково-технічного прогресу? Наскільки важливий зв'язок між БМІ і медичними технологіями і чи варто їх розділяти? В цілому галузь БМІ посідає чільне місце за впливом на економіку Європи. БМІ потребуватиме напружених освітянських зусиль для забезпечення її необхідними людськими ресурсами.

Уніфікація якості і акредитація освітянських програм із подальшим швидким їх поширенням, а також політичні зміни у Європі, які підвищують можливість і мобільність працевлаштування в Європейській сфері вищої освіти, потребують від університетів і професійних асоціацій в галузі БМІ активної участі у формуванні майбутнього цієї дуже успішної і перспективної дисципліни шляхом керівництва розвитком вищої освіти і наукових досліджень в цій галузі.

З метою подальшої підтримки високої якості біо-медико-інженерної освіти створена «Міжнародна федерація медичної і

біологічної інженерії», а також підтримуваний нею новоутворений «Європейський альянс медичної і біологічної інженерії і наук», які об'єднують національні і транснаціональні європейські асоціації, навчальні заклади і промисловість, пов'язану із медико-біологічною інженерією і наукою. Ці організації ведуть облік і координацію всіх медико-біологічних освітніх і наукових програм у Європі і готують рекомендації для створення сучасної освіти з напрямку БМІ.

З огляду на це, в 2005 р. міжнародна федерація медичної і біологічної інженерії затвердила «Критерії з акредитації освітніх програм з БМІ для Європи», які відповідають вимогам Болонської декларації, підписаної 29 європейськими країнами в 1999 р. Головні гравці в цьому процесі – університети. Першочергові завдання в цьому контексті такі: • акредитація освітніх програм; • стажування; • продовження освіти протягом життя.

Досягнення можливості безперешкодного працевлаштування в Європі і обміну новітніми технологіями потребує гармонізації вищої освіти і в галузі БМІ. Тому акредитація освітніх програм з БМІ, які ґрунтуються на критеріях, узгоджених по всій Європі – є необхідною умовою реалізації всіх інших завдань. З метою розробки рекомендацій з акредитації Робоча група з акредитації сертифікації Асоціації біомедичних інженерів Німеччини (Working Group for Accreditation and Certification of the German Society for Biomedical Engineering (DGBMT)) взяла на себе ініціативу складання каталогу ключових визначень. В результаті цієї роботи створено документ, розміщений за адресою: <http://www.vde.com/de/fg/dgbmt/studiumberuf/gegenstandskatalog/> – який є практично паспортом спеціальності БМІ.

Перспективи біо-медико-інженерної освіти в Україні навчальна програма з БМІ в Україні, також як і в країнах Європи, повинна давати освіту, що дозволяє організовувати і виконувати фундаментальні і прикладні дослідження в цій мультидисциплінарній галузі. Спеціалісти мають досвід комплексного підходу до досліджуваних об'єктів, який дозволяє: розвивати існуючі міждисциплінарні концепції і створювати нові; приймати безпосередню участь у розробці високотехнологічних підходів до втручання в процеси життєдіяльності, контролювати їх ефективність. БМІ є тією ланкою, яка здійснює взаємозв'язок

клінічної практики, наукових досліджень і виробництва. Спеціалісти з біомедичної інженерії мають виконувати подвійну функцію: з одного боку вони впроваджують наукові досягнення в клінічну практику, а з іншого – трансформують потреби і завдання клінічної практики у напрямки наукових досліджень і виробництва. Оскільки така взаємодія створює нові інструменти і технології для медичної практики, тому бакалаврат за спеціальністю „Біомедична інженерія” може завершуватися спеціалізацією з медичної інженерії, клінічної інженерії, медичної інформатики, біомедичної фізики, а також вже існуючих в Україні напрямків, таких як: фізична і біомедична електроніка; медичні прилади і системи; біотехнічні та медичні апарати і системи; медичні акустичні та біоакустичні прилади і апарати.

Оскільки із вказаних вище напрямків підготовки медична та клінічна інженерія є новими для України прикладними складовими БМІ, слід підкреслити, що вони спрямовані на забезпечення технологічної відповідності експлуатації в медичній практиці складного обладнання, застосування матеріалів і виробів медичного призначення; контролю і сертифікації їх якості і безпечності; коректності в отриманні, інтерпретації і обробці біомедичної інформації.

Слід відзначити також те, що включення українського напрямку підготовки з БМІ до галузі знань «Біотехнологія» відповідає найсучаснішим світовим тенденціям, оскільки медичні біотехнології, пов'язані із застосуванням молекулярної хімії (генної інженерії), стовбурових клітин, клітинної та тканинної інженерії є розділом сучасної БМІ. Останнім часом у Європі фахівці з БМІ, отримавши додатково середню медичну освіту, приймають безпосередню участь у застосуванні техноємних методів діагностики і лікування.

## **2. Основні поняття і визначення з напрямку БМІ**

На даний час значно підвищується ефективність наукового, технічного, фармакологічного і інформаційного забезпечення охорони здоров'я. Так, за даними міжнародної організації «**The World Medical Market Fact File**» (WMMFF), медичні вироби (МВ) за обсягом, номенклатурою, асортиментом і кількістю

займають одне з перших місць в світі, випереджаючи таку динамічну галузь, яка розвивається, як «обчислювальна техніка та інформатика». До МВ будемо відносити вироби медичного призначення та медичну техніку, зокрема: прилади, апарати, інструменти, пристрої, комплекси, системи з програмними засобами, обладнання, пристосування, перев'язувальні і шовні засоби, стоматологічні матеріали, набори реагентів, контрольні матеріали і стандартні зразки, вироби з полімерних, гумових та інших матеріалів, які застосовують в медичних цілях окремо або в поєднанні між собою і які призначені для профілактики, діагностики, лікування захворювань, реабілітації, проведення медичних процедур, досліджень медичного характеру, заміни або модифікації частин тканин, органів і організму людини, відновлення або компенсації порушених чи втрачених фізіологічних функцій, контролю над зачаттям, впливу на організм людини таким чином, що їх функціональне призначення не реалізується шляхом хімічного, фармакологічного, імунологічного або метаболічного взаємодії з організмом людини.

Обсяг продажів МВ в світі переважає 300 млрд доларів США, з яких на частку США припадає понад 70 млрд доларів. Для здійснення прориву в області інноваційних медико-біологічних технологій, необхідно чітко уявляти тенденції і перспективи розвитку сучасної біомедичної інженерії.

В Україні виробництво медичної техніки і матеріалів медичного призначення дуже обмежене і знаходиться на початковій стадії свого розвитку. Забезпечення всіх потреб вітчизняної охорони здоров'я у зазначених вище виробках і технологіях за рахунок імпорту недоцільне, а часом неможливе з економічних міркувань. Необхідним є створення вітчизняної матеріально-технічної і наукової бази для виробництва медичного обладнання, матеріалів і засобів профілактики. Крім того, впровадження і експлуатація високотехнологічного медичного обладнання і спеціалізованих матеріалів медичного призначення висуває нові вимоги до компетентності експертів, розробників та інженерного персоналу який супроводжує інсталяцію і експлуатацію обладнання у лікувальних закладах.

Відомо, що наукомісткі МВ розробляються на стику біології і фізики, медицини і радіоелектроніки, математики та біомеханіки,

біохімії та інформатики і т.д. Ні в якому разі не випадковий той факт, що за велику кількість світових досягнень в цих областях їх автори отримали Нобелівські премії. Перерахуємо деякі з них.

**1901 р.** – Вільгельм Конрад Рентген - перша Нобелівська премія з фізики за відкриття рентгенівських променів. Це відкриття дозволило створити потужні засоби візуалізації для точної діагностики значної кількості захворювань і травм.

**1903 р.** – Нільс Фінсен, датський лікар - премія в галузі фізіології або медицини за «застосування концентрованих світлових променів», що стало новим напрямком в медичній науці, оскільки на даний час сучасну медицину неможливо уявити без застосування різноманітних видів концентрованих потоків електромагнітної енергії, які впливають на біологічні об'єкти, в першу чергу, лазерних технологій.

**1924 р.** – Біллем Ейндховен, голландський лікар - премія в галузі фізіології або медицини за «відкриття механізму електрокардіограми» і створення першого електрокардіографа для вимірювання електричної активності серця.

**1952 р.** – Фелікс Блох і Едуард Перселл (США) - премія в галузі фізики за «розвиток нових методів для точних ядерних магнітних вимірів і пов'язані з цим відкриття», що відкрило шлях до застосування ядерно-магнітного резонансу (ЯМР) в медицині і біології та стало значним поштовхом у розвитку систем візуалізації біоб'єктів.

**1964 р.** – Микола Басов, Олександр Прохоров (СРСР) і Чарлз Таунс (США) - премія в галузі фізики за «створення генераторів і підсилювачів, заснованих на лазерно-мазерному принципі».

**1979 р.** – Аллан Кормак (США) і Готфамі Хаунсфілд (Великобританія) - премія в галузі фізіології або медицини за створення рентгенівського комп'ютерного томографа (РКТ), що стало тріумфом медико-технічної науки ХХ століття.

**1986 р.** – Герд Бінніг (ФРН) і Хенрі Рорер (Швейцарія) - премія в галузі фізики за тунельний мікроскоп (STM), котра поклала початок розвитку та застосування нанотехнологій в тому числі і для біоб'єктів.

**2002 р.** – Жорес Алфьоров (Росія) і Герберт Кремер (ФРН) - премія в галузі фізики за «розвиток напівпровідникових гетероструктур, які використовуються в високошвидкісний



електроніці та оптоелектроніці», в тому числі і в біологічній та медичній практиках.

Одночасно з диференціацією наук, їх все більшою спеціалізацією на традиційних межах виникають нові міждисциплінарні напрямки, які стають містками взаємного проникнення різних областей знання в ім'я загальнолюдського прогресу. Медико-технічні науки, такі як біомедична кібернетика, біоніка, біомеханіка і ін., є також прикладом взаємопроникнення медичних і технічних наук заради пізнання природи здоров'я і різних захворювань людини.

На даний час можна назвати наступні основні сфери застосування біомедичної техніки.

**Біологічна інженерія** – фундаментальні та прикладні дослідження різних біосистем, в тому числі і на рівні нанорозмірів, для вирішення практичних завдань молекулярної біології, медицини, фармацевтичної, харчової промисловості та сільського господарства і агрокультури.

**Медична інженерія** – дослідження, проектування і виготовлення нових наукоємних медичних виробів для діагностики, терапії і хірургії, створення штучних органів; експлуатація та сервісне обслуговування медичних систем, комплексів і апаратів безпосередньо в медичних центрах, лікувально-профілактичних установах (ЛПУ) різного рівня.

**Біоінформаційна інженерія** – розробка автоматизованих інформаційних систем медичного призначення, проблемно-орієнтованих баз даних та баз знань, експертних медичних систем.

**Медико-екологічна інженерія** - рішення проблем взаємодії людини з постійно ускладнюючим місцем її існування, а також контролю і захисту людини від патогенних факторів зовнішнього середовища.

**Реабілітаційна індустрія** – дослідження, проектування, виробництво та експлуатація технічних засобів (ТЗ) для реабілітації осіб з обмеженнями життєдіяльності.

**Медицина катастроф** – дослідження, проектування, виробництво та експлуатація ТЗ для екстремальної медицини.

Таким чином, всі перераховані вище напрями можна об'єднати одним загальною назвою – біомедична інженерія (БМІ). БМІ – міждисциплінарна область фундаментальної і прикладної

науки і техніки, що включає в себе: наукові дослідження на стику «живе і неживе», в тому числі створення інтерфейсу між «живою» і «неживою» природою; адекватну взаємодію технічних і біологічних об'єктів на нанорівні, з метою створення біотехнічних систем (БТС) нового покоління; діагностичні дослідження, лікувальні процедури і реабілітація в умовах медичних центрів і ЛПУ різного профілю, в установах профілактичної медицини, спортивно-оздоровчих комплексах, курортно-санаторних організаціях, різних об'єктах спеціальної та галузевої медицини та ін.; оцінку середовища проживання і санітарно-гігієнічних умов життя людини в побутових і виробничих приміщеннях, контроль якості продуктів харчування і питної води, промислових стоків, викидів і відходів для оцінки впливу на його здоров'я; біологічні експерименти в умовах біостанцій, біологічних дослідницьких лабораторій і екологічних центрів; розробку нестандартних методик перевірки, калібрування і тестування медичного обладнання, апаратів, систем і комплексів, а також ТЗ біологічних лабораторій; розробку нових методів дослідження стану біологічних об'єктів (БО) та управління цим станом, а також нових медичних технологій із застосуванням високоефективних технічних і комп'ютерних засобів; обробку біомедичної інформації, створення і експлуатацію медичних БД, експертних, моніторингових систем з використанням сучасних пакетів прикладних програм інформаційної підтримки діагностичного та лікувального процесів.

Світовий досвід свідчить про те, що нові біомедичні технології і технічні системи, які їх реалізують, з'являються і асимілюються клінічною практикою, перш за все шляхом перенесення ідеї і досягнення фізики, хімії, математики, радіоелектроніки, інформатики в біологічну та медичну проблематику і практичні застосування.

Аналіз результатів, відзначених Нобелівськими преміями в області фізіології і медицини, добре демонструє принципи формування і розвитку біомедичної інженерії в XX столітті.

Основними сферами застосування БМІ є:

в охороні здоров'я – фундаментально-наукова охорона здоров'я (генна інженерія), фармакологія (синтез і об'ємне моделювання лікарських речовин);

в медицині екстремальних ситуацій – біороботи (в тому числі роботи-хірурги та мікророботи), лазерні та біосенсорні системи для експрес-діагностики, телемедичні системи;

в медичній промисловості – розробка (проектування) і виготовлення нових приладів, апаратів і інших МВ для біотехнічних систем (БТС) різного призначення;

в галузевій медицині – авіаційна і космічна апаратура контролю та підтримки життєдіяльності людини, спортивні радіоелектронні комплекси та тренажери, медичні вироби для курортно-санаторної медицини, тренажерно-моделювальні комплекси професійної підготовки фахівців різного профілю в людино-машинних системах (в атомній енергетиці, транспорті, космосі, підводних дослідженнях, спеціальних інформаційних службах і т. д.);

в біології – створення комплексів керованого біологічного експерименту, що включають як прецизійні медичні вироби дію на біооб'єкти, так і автоматизовані засоби знімання, обробки, формування керуючих команд і інтерпретації результатів;

в реабілітаційній індустрії – розробка біотехнічних систем реабілітації та створення адаптивної навколишнього середовища для осіб з обмеженнями життєдіяльності;

в харчовій промисловості – контроль якості продуктів харчування, створення біоактивних додатків, що не роблять шкідливого впливу на людину, і інше;

в екології – контроль середовища проживання людини, в цьому числі аналіз впливу природних і виробничих факторів на екологію людини;

в комп'ютерній техніці – створення нового покоління комп'ютерів – біокомп'ютерів.

Позитивні тенденції в розвитку медико-технічної науки і її практичне застосування пов'язані зі збільшенням витрат на охорону здоров'я в багатьох країнах в останнє десятиліття і, відповідно, зі збільшенням витрат на закупівлю сучасних МВ. Наслідком цього є істотне зростання інвестицій в наукові дослідження для розвитку нових і перспективних напрямів такої інтегральної предметної області, як БМІ. У передових країнах (при загальному «обсязі споживання медичних виробів» в розмірі

десятків мільярдів доларів на рік) витрати на науково-дослідні і конструкторські роботи досягають 10-15%. Цей показник збільшився за останні десять років більш ніж в два рази і став порівняним з обсягами інвестицій в фармацевтичну промисловість.

Відзначимо, що проблема здоров'я нації є стратегічною проблемою будь-якої цивілізованої країни, що зумовлює необхідність розробки і застосування сучасних медичних виробів, нових медичних технологій і методів управління, спрямованих на істотне підвищення якості в сфері вітчизняної охорони здоров'я.

Таким чином, можемо сформулювати, що **«Біомедична інженерія»** – це міждисциплінарна наука, яка вивчає принципи функціонування технічних пристроїв для дослідження біологічних процесів, діагностичної та терапевтичної апаратури, моделювання життєвих процесів з точки зору фізичних законів та математичних закономірностей, що дозволяє створювати біотехнічні системи різного призначення.

Код та найменування спеціальності 163 «Біомедична інженерія». Рівень вищої освіти перший (бакалаврський). Спеціалізація «Біомедична інженерія». Освітня програма «Біомедична інженерія». Загальний обсяг у кредитах Європейської кредитної трансферно-накопичувальної системи та строк навчання 240 кредитів ЄКТС, 3 роки 10 місяців.

**У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен:**

**«Знати»** призначення та область завдань, яку обслуговує спеціальність “біомедична інженерія”; фізичні принципи роботи сучасної лікувально-діагностичної апаратури; принципи організації навчання по обраній спеціальності; структуру навчального плану по обраній спеціальності.

**«Уміти»** орієнтуватися у сучасних напрямках розвитку лікувально-діагностичного засобів на основі новітніх фізичних методів; розробляти нове та належно обслуговувати вже наявне високотехнологічне медичне обладнання у медичних закладах;

розуміти профіль своєї підготовки у вузі, напрямок професії та перспективи працевлаштування.

### **3. Загальна характеристика освітньої програми з підготовки студентів бакалаврату по спеціальності БМІ.**

**Метою** освітньо-професійної програми є формування професійної компетентності фахівців із спеціальності “Біомедична інженерія”, що спрямована на здатність розв'язувати спеціалізовані задачі планування, проектування, розробку, встановлення та експлуатацію біомедичних пристроїв і приладів.

Зарахування проводиться на загальних умовах вступу: за результатами конкурсу сертифікатів зовнішнього незалежного оцінювання знань і вмінь (ЗНО) з предметів: «Українська мова та література», «Біологія» та «Історія України/Іноземна мова» з урахуванням середнього балу документа про повну загальну середню освіту та балів за особливі успіхи.

Спеціальні вимоги до професійного відбору вступників відсутні.

**Результати навчання (компетентності), якими має володіти здобувач вищої освіти.**

Важливим елементом освітньо-професійної програми підготовки бакалавра спеціальності «Біомедична інженерія» є досягнення здобувачами першого рівня вищої освіти запланованих результатів навчання шляхом засвоєння відповідних модулів (навчальних дисциплін та практик).

Формулювання програмних результатів навчання здійснюється відповідно до ключових загальних та спеціальних (фахових) компетентностей. Процес вивчення навчальних дисциплін спрямований на формування наступних компетентностей:

### **Інтегральна компетентність (ІК):**

(ІК-1). Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми у біомедичній інженерії або у процесі навчання, що передбачає застосування хімічної та біоінженерії, і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

### **Загальні компетентності (ЗК):**

- (ЗК-1) Здатність сприймати, розуміти, узагальнювати, зберігати та застосовувати отримані знання.
- (ЗК-2) Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями як в колективі, так і самостійно.
- (ЗК-3) Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях та проводити дослідження на відповідному рівні.
- (ЗК-4) Знання та розуміння предметної області професійної діяльності.
- (ЗК-5) Здатність спілкуватися державною та іноземною мовами як усно, так і письмово.
- (ЗК-6) Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.
- (ЗК-7) Здатність знаходити, обробляти та аналізувати інформацію з різних джерел.
- (ЗК-8) Здатність приймати обґрунтовані рішення.
- (ЗК-9) Здатність спілкуватися з представниками інших професійних груп різного рівня (з експертами з інших галузей знань/видів економічної діяльності).
- (ЗК-9) Здатність використовувати фундаментальні поняття і закони біології, хімії, медицини, фізики та математики у сфері професійної діяльності.
- (ЗК-10) Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу на основі логічних аргументів та перевірених фактів.
- (ЗК-11) Здатність працювати в колективі, толерантно сприймаючи соціальні, етнічні, конфесійні та культурні відмінності.
- (ЗК-12) Прагнення до збереження навколишнього середовища.

### **Спеціальні компетентності (СК):**

- (СК-1) Здатність застосовувати пакети інженерного програмного забезпечення для проведення досліджень, аналізу, обробки та представлення результатів.
- (СК-2) Здатність забезпечувати інженерно-технічну експертизу в процесі планування, розробці, оцінці та специфікації медичного обладнання.
- (СК-3) Здатність вивчати нові методи та інструменти аналізу, моделювання, проектування та оптимізації.
- (СК-4) Здатність розуміти технічні і функціональні характеристики систем, методів і процедур, що використовуються в медицині та біології (при профілактиці, діагностиці, лікуванні та реабілітації).
- (СК-5) Здатність розробляти, планувати і застосовувати математичні методи в аналізі, моделюванні функціонування живих організмів, систем і процесів в біології та медицині.
- (СК-6) Здатність планувати, проектувати, розробляти, встановлювати, експлуатувати і підтримувати прилади, обладнання та системи для профілактики, діагностики, лікування і реабілітації.
- (СК-7) Здатність ефективно використовувати інструменти та методи для аналізу, проектування, розрахунку та випробувань при розробці біомедичних продуктів і послуг.
- (СК-8) Здатність забезпечити, встановити випробувальне устаткування, що використовується в лікарнях і науково-дослідних інститутах і підтримується на оптимальному рівні функціонування, а також, контролювати і координувати ремонт.
- (СК-9) Здатність проводити дослідження та спостереження щодо взаємодії біологічних, природних та штучних систем (протези, штучні органи та ін.).

- (СК-10) Здатність планувати технічне обслуговування медичного обладнання.
- (СК-11) Здатність ідентифікувати, формулювати і вирішувати інженерні проблеми, пов'язані з взаємодією між живими і неживими системами.
- (СК-12) Здатність обирати і використовувати відповідне обладнання, інструменти та методи для реалізації та контролю медичного обладнання.
- (СК-13) Здатність застосовувати базові знання з комп'ютерного програмного забезпечення для автоматизованого проектування медичних приладів та систем.
- (СК-14) Розуміти принципи побудови сучасних автоматизованих систем управління виробництвом медичних приладів, їх технічне, алгоритмічне, інформаційне і програмне забезпечення.
- (СК-15) Володіння практичними навичками щодо правового регулювання патентного права та фундаментальними знаннями щодо правової охорони об'єктів інтелектуальної власності та їх захисту в Україні та світі.
- (СК-16) Володіння навичками розробки і впровадження оперативних заходів цивільного захисту.

Згідно освітньої програми «Біомедична інженерія» з циклу підготовки бакалаврів в ДВНЗ «Ужгородський національний університет» навчальний процес будується на основі наступних дисциплін.

#### **Цикл загальної підготовки.**

##### **Обов'язкові навчальні дисципліни.**

#### **1. Гуманітарні та соціально-економічні дисципліни.**

##### **1.1 Нормативні початкові дисципліни.**

1. Ділова українська мова
2. Іноземна мова
3. Історія та культура України



4. Філософія
5. Безпека життєдіяльності та охорона праці
6. Фізичне виховання

### **Цикл загальної підготовки**

#### **1.2 Дисципліни природничо-наукової (фундаментальної) підготовки**

1. Вища математика, в т.ч.
  - 1.1. Аналітична геометрія і лінійна алгебра
  - 1.2. Диференціальне та інтегральне числення
  - 1.3. Основи дискретної математики
  - 1.4. Теорія ймовірностей та математична статистика
2. Фізика, у т.ч.
  - 2.1. Механіка, молекулярна фізика і термодинаміка
  - 2.2. Електрика і магнетизм, оптика
  - 2.3. Атомна і ядерна фізика
3. Біофізика
4. Загальна хімія
5. Біохімія
6. Основи анатомії та фізіології людини
7. Екологія

#### **1.2. Дисципліни вільного вибору студентів**

1. Інтелектуальна власність / Цивільний захист
2. Маркетинг та менеджмент в біомедичній інженерії / Економіка та організація виробництва

#### **1.3. Дисципліни за вибором вуза**

1. Фізичний практикум
2. Біомедична термінологія та етика

### **2. Цикл професійної підготовки**

#### **2.1. Нормативні навчальні дисципліни**

1. Вступ у спеціальність
2. Інформатика, в т.ч.:
  - 2.1. Архітектура комп'ютерів
  - 2.2. Алгоритмічні мови програмування
3. Інженерна і комп'ютерна графіка
4. Електроніка, в т.ч.:

- 4.1. Основи теорії кіл та сигналів
- 4.2. Електронні прилади (Елементна база сучасної електроніки)
- 4.3. Аналогова схемотехніка
- 4.4. Цифрова схемотехніка
- 4.5. Мікропроцесорна техніка з курсовим проектом
5. Біомедичні прилади, апарати і комплекси
- 5.1. Лабораторна аналітична техніка
- 5.2. Діагностична техніка
- 5.3. Лікувальна техніка
6. Біомеханіка
7. Основи метрології і стандартизації
8. Економіка і бізнес (Медикобіологічні дослідження )

#### **Цикл практичної підготовки**

1. Ознайомча практика (2 тижні)
2. Виробнича практика (4 тижні)
3. Виконання кваліфікаційної роботи із захистом

#### **2.2 Дисципліни вільного вибору студента**

1. Плазмова і ультрафіолетова дезінфекція об'єктів БМІ
2. Математичне моделювання процесів і систем 2. Інструментальні методи медико-біологічних досліджень/ Матеріалознавство і біосумісні матеріали
3. Нанотехнології в біології та медицині / Системи медичної візуалізації
4. Фізичні методи очищення води / Основи теорії біотехнічних систем

#### **Блок А**

5. Системи променевої терапії / Контроль якості технологій діагностики та терапії
6. Моделювання біологічних процесів і систем / Нелінійна термодинаміка синергетики
7. Основи оптичної спектроскопії великих молекул / Комп'ютерне моделювання біосистем.
8. Фізика екосфери / Медичні кріотехнології

9. Магнітобіологія / Програмування мікроконтролерів

**Блок Б**

10. Об'єктно-орієнтоване проектування медичних програмних засобів / Прикладне програмне забезпечення в БМІ

11. Основи телемедицини / Засоби біомедичних вимірювань

12. Інструментальні засоби медичних інформаційних систем / Якість медичного програмного забезпечення та тестування

13. Обчислювальні методи в генетиці / Технічний захист інформації в БМІ

14. Експлуатація БМА / Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування.

Детальна ідентифікація обсягів знань і вмінь студентів рівня підготовки «бакалавр» наведена в пункті «Додаток».

**Контрольні запитання**

- 1. Що в біомедичній інженерії відноситься до медичних виробів?*
- 2. Охарактеризуйте основні результати біомедичної інженерії, які були удостоєні Нобелівськими преміями.*
- 3. Якими на даний час є базові застосування біомедичної техніки?*
- 4. Що включає «БМІ», як міждисциплінарна область фундаментальної і прикладної науки? Якими є основні сфери застосування «БМІ»?*

## **ТЕМА–2. ІНАКТИВАЦІЯ І ДЕЗІНФЕКЦІЯ ОБ’ЄКТІВ БІОМЕДИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ УЛЬТРАФІОЛЕТОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ТА ПІД ДІЄЮ ОЗОНУ**

Протягом тривалого часу для знезараження і дезінфекції води та поверхонь застосовувалися окислювальні технології із застосуванням хлору та інших хімічних сполук. Для повітря ці хімічні технології не застосовувалися, оскільки більшість хімічних дезінфектантів або отруйні, або роблять украй негативні впливи на здоров'я людей при їх вдиханні з повітрям. Багаторічні дослідження впливу хімічних дезінфектантів на здоров'я населення показують стійку кореляцію між захворюваннями органів дихання, травлення, запалень слизових оболонок і вмістом в атмосфері шкідливих хімічних реагентів. У 70-х роках минулого століття було також виявлено, що побічні продукти (галогенорганічні сполуки), які утворюються під час хлорування води, в питній воді становить небезпеку для здоров'я людей, а в стічних водах завдають серйозної шкоди екології водойм. При цьому, хлорування і інші окисні технології знезараження малоефективні по відношенню до вірусів.

Незважаючи на те, що історія знезараження води триває вже два століття, в даний час розвиваються нові методи і особливо активно фізичні методи, в тому числі удосконалюються відомі методи, наприклад, застосування ультрафіолетового (УФ) випромінювання чи озонування.

Знезараження повітря протягом тривалого часу проводилося, в основному, в лікувально-профілактичних установах і тільки останнім часом починає застосовуватися на транспорті, в торгових і офісних приміщеннях. У цій тенденції є об'єктивні причини. Повітряно-крапельні інфекції представляють одну з найгостріших проблем інфекційної безпеки. Поява нових небезпечних видів інфекцій, що передаються повітряно-крапельним шляхом, наявність загроз біотероризму, перевезення інфікованих пасажирів в містах з масовим скупченням людей, можливість перевезення за короткий термін інфекції на великі відстані, наприклад літаком, підвищують ризик поширення інфекційних захворювань. Це, в свою чергу, підвищує актуальність вдосконалення наявних методів знезараження повітря і створення нових. Знезараження

повітря необхідно в місцях масового перебування людей: лікарні, громадський транспорт, вокзали, шкільні установи, театри, закриті спорткомплекси та ін. Залишаються проблеми і з знезараженням в лікувальних установах. Від 5% до 10% пацієнтів, що надходять в сучасні стаціонари в розвинених країнах, отримують внутрішню лікарняну інфекцію. При цьому, одним з основних факторів передачі лікарняної інфекції є повітря і різні поверхні.

Знезараження повітря закритих приміщень має свої особливості: складність або неможливість застосування хімічних дезінфектантів в присутності людей, швидке перемішування і перетікання повітря в різних приміщеннях, наявність в приміщеннях джерел інфікування (хворі люди) і можливість повторного інфікування повітря. Застосування з метою знезараження хімічних реагентів призводить до невиправданого зростання хімічного навантаження на людину. На відміну від промислових хімічних забруднень, дезінфектанти вносяться безпосередньо в середовище проживання людини і їх застосування жорстко обмежене нормативами на залишковий вміст засобів, які здійснюють стерилізацію.

У зв'язку з появою нових, раніше не використовуваних в повсякденній практиці методів знезараження, а також активною рекламою нових технологій і їх нових можливостей, перед споживачами виникає складний вибір між різними методами знезараження, особливо для знезараження в відповідальних місцях, наприклад, в лікарнях, операційних і післяопераційних палатах. Особливо складним це питання стає при виборі методів і обладнання для знезараження повітря, коли необхідно врахувати ефективність і надійність знезараження, розміри приміщення, тривалість обробки, простоту експлуатації, вартість обладнання, розміри і вага, і інші фактори.

### **1. Основні поняття і визначення.**

Початок експериментальних досліджень впливу УФ-випромінювання на мікроорганізми і створення відповідних джерел випромінювання можна датувати 1892 роком, коли було запропоновано використовувати дугу Петрова для знезараження залізничних вагонів. Ефективність методу виявилася незначною. Однак, у той же самий час професором А.М. Маклаковим було

показано, що різні ділянки спектру роблять різну біологічну дію на віруси і мікроорганізми. Лише значно пізніше, у 1935-41 рр., вдалося надійно встановити, що знезаражуючі властивості випромінювання на  $\lambda = 253.7$  нм у 4000 разів вищі, ніж випромінювання на  $\lambda = 365$  нм і приблизно в 10000 разів вище, ніж на  $\lambda = 404.7$  нм.

Для позначення процесу знезараження **УФ-** випромінюванням застосовуються терміни «**дезінфекція**», «**стерилізація**» і «**інактивація**». **Стерилізація** (від лат. «sterilis» - безплідний) припускає фізичне знищення всіх патогенних і непатогенних мікроорганізмів, включаючи їхні спори. **Дезінфекція** розуміється не як результат дії, а як технологія, що знижує число патогенних бактерій, вірусів, найпростіших і спор за рахунок їх незворотної і повної інактивації так, що їхня концентрація істотно знижується. Слово «**інактивація**» вимагає окремого пояснення, позначаючи пригнічення активності системи. У термінах радіобіолога В.І. Корогодіна і біолога М. Ічаса, інактивована біосистема втрачає здатність до цілеспрямованого поведіння в звичних для неї умовах. Тому сутність фотохімічної інактивації буде полягати в тому, що під дією поглиненого кванта світла система втрачає здатність до відтворення генетичної програми, для якої вона була створена.

Термін «**інактивація**» може бути використаний стосовно як до клітини в цілому, так і до окремих її підсистем. Наприклад, будемо говорити, що фермент пепсин інактивований, якщо він не виконує своєї функції розщеплення білків рослинного і тваринного походження, чи просто руйнується на частини, які уже не підлягають збиранню та відновленню. Про бактерії або клітини можна сказати, що вони інактивовані, якщо вони тим чи іншим чином втратили здатність до розмноження.

При опроміненні бактеріальних культур завжди утворюються різні мутантні типи: деякі з них можна вважати цілком інактивованими, тому що в них зникла здатність до розмноження, а стосовно мутантів інших типів можна вести мову тільки про інактивацію деяких клітинних підсистем, але не системи в цілому. В останньому випадку, якщо неушкодженим залишився апарат, що відновлює порушення, то через якийсь час, система може

знову стати життєздатною і навіть придбати стійкість до випромінювання.

Найбільш ефективною інактивуючою дією володіє УФ-випромінювання з довжинами хвиль 200-295 нм, тому даний діапазон спектру сьогодні називають **бактерицидним** («бактеріо» + лат. «цидо» (убиваю). Однак, у рамках бактерицидного діапазону чутливість вірусів і кліток різного походження до дії УФ-випромінювання розрізняється дуже сильно. Так, для інактивації 90% фага  $\phi$  X174 потрібна у три рази менша доза опромінення, ніж для бактерій *Escherichia coli*.

Щоб характеризувати специфічність відгуку тієї чи іншої культури на УФ-опромінення, використовується *коефіцієнт супротиву*

$$R = -Et \lg(e) / \lg(n/n_0) = -D / \ln(n/n_0), \quad (1)$$

де  $E$  – енергетична освітленість, Вт/см<sup>2</sup>;  $t$  – час експозиції, з;  $n_0$  – початкове число і  $n$  – число мікроорганізмів, які вижили після опромінення,  $D$  - доза чи енергетична експозиція, Дж/см<sup>2</sup>. Зміст коефіцієнта  $R$  – кількість бактерицидної енергії (енергетична експозиція), необхідної для знезаражування середовища, прозорої для бактерицидних променів, до ступеня рівної 0.368 (значить  $R = D_{37}$ ), чи, іншими словами, це доза, необхідна для скорочення чисельності життєздатних мікроорганізмів у  $e$  разів. Визначивши в такий спосіб чутливість деякої конкретної культури, ми далі можемо використовувати її як еталонну, стверджуючи, що для іншої культури чи більше або менше. Наприклад, коефіцієнт супротиву для *Bact. coli communis* складає 2.53 мДж/см<sup>2</sup>, а для *Bact. subtilus*  $R = 6.18$  мДж/см<sup>2</sup>, тобто в 2.4 рази вище.

Традиційно дані про чутливість і, відповідно, *резистентності* (від лат. «resisto» – пручаюся) мікроорганізму до випромінювання знаходять експериментально, опромінюючи різними дозами  $D$  розчини або підкладки з заданою концентрацією мікроорганізмів  $n_0$ . Потім будують криву:

$$n_0 / n = F(E, t) = F(D) \quad (2)$$

По її ходу можна судити про резистентність культури до УФ-випромінювання і провести порівняння способів інактивації даної конкретної культури різними методами. Якщо число мікроорганізмів в експериментах міняється в широких межах, наприклад  $n_0$  досягає  $10^7$ , а  $n \sim 10$  то зручніше користатися логарифмічним представленням:

$$\log(n_0 / n) = F(D), \quad (3)$$

де  $\log(n_0/n)$  називають *ступенем знезараження*, який показує на скільки порядків змінилася концентрація життєздатних мікроорганізмів після опромінення.

Отже, виразами (1)–(3) можна користатися для оцінки ступеня інактивації мікроорганізмів та біомолекул, а також для порівняння бактерицидної дії різних джерел випромінювання. Але інформації про те, за рахунок яких порушень у мікроорганізмі досягається його УФ-інактивація ми не одержуємо. Відповідь на це питання у фотобіології дається оптичними методами, які ґрунтуються на побудові *спектрів дії випромінювання*.

Перш ніж визначити спектр дії випромінювання скажемо декілька слів про хід фотобіологічних процесів взагалі. Кожен фотобіологічний процес може бути умовно розбитий на наступні етапи: 1) поглинання кванта світла молекулою; 2) внутрімолекулярний перерозподіл поглиненої енергії (т.зв. фотофізичні процеси); 3) міжмолекулярний обмін енергією; 4) первинний фотохімічний акт; 5) темнові реакції з утворенням стабільних фотопродуктів; 6) біохімічні реакції з фотопродуктами; 7) підсумкові продукти.

Кожний з цих етапів характеризується *квантовим виходом*  $\phi$  даного процесу. Для процесу фотохімічної інактивації молекули  $\phi$  є відношенням числа виведених з ладу (у зазначеному вище змісті слова) молекул до числа поглинутих квантів. Зрозуміло, структурне ушкодження молекули може відбутися як на етапі 4), так і на наступних етапах.

З теорії зіткнень відомо, що будь-яку мішень, до якої рухається потік часток  $\Phi$  (у нашому випадку це потік квантів світла) можна охарактеризувати поняттям *ефективного перерізу зіткнення*  $s$ , що має розмірність  $[\text{см}^2]$ , і такий що:



$$\Phi \cdot s = n \cdot v \cdot s = f, \quad (4)$$

де  $n$  – концентрація,  $\text{см}^{-3}$ ;  $v$  – швидкість часток, що налітають на мішень,  $\text{см/с}$ ,  $f$  – частота зіткнень з мішенню.

За *законом Ламберта-Бугера-Бера* всяку молекулу теж можна представити як мішень з деяким ефективним перерізом  $s$ , при влученні на яку відбувається поглинання кванта світла. Користаючись поняттям квантового виходу і представленнями теорії зіткнень у фотохімії ввели поняття **поперечного перерізу фотохімічної реакції**

$$\sigma = \varphi \cdot s. \quad (5)$$

Зрозуміло, що оскільки найчастіше  $\varphi < 1$ ,  $\sigma < s$ . Оба перерізи однаково залежать від довжини хвилі  $\lambda$  випромінювання, яке падає, а сама залежність  $\sigma(\lambda)$  називається **спектром дії фотохімічної реакції**.

Процедура знаходження форми спектру дії полягає у визначенні значень  $\sigma$  на різних довжинах хвиль. Розглянемо найпростіший випадок визначення  $\sigma$  процесу фотоінактивації ферменту, який розведений в розчині до концентрації  $n$ . Зробимо кілька спрощень, так нехай довжина шляху світла  $l$  у кюветі – 1 см, а площа, яка опромінюється,  $1 \text{ см}^2$ . Тоді зменшення густини активного ферменту  $dn$  з розчину за час  $dt$  запишеться наступним чином:

$$dn = -\varphi(I - I_0)dt, \quad (6)$$

де  $I$  і  $I_0$  – інтенсивності променів світла, що падають і проходять через розчин,  $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , і тоді  $(I - I_0)$  – поглинене за 1 с на  $1 \text{ см}^2$  число квантів. Інтегруючи вираз (6) з урахуванням закону Бугера-Ламберта-Бера, і, з огляду на те, що для розбавлених розчинів  $snl < 0.1$ , можна одержати, що

$$\ln(n_0 / n) = I_0 \cdot t \cdot s \cdot \varphi = D \cdot \sigma, \quad (7)$$

де  $D$  – доза опромінення,  $\sigma$  – поперечний переріз інактивації ферменту.

Тепер, якщо побудувати графік залежності  $\ln(n_0/n) = f(D)$ , то тангенс кута нахилу отриманої прямої дасть нам величину  $\sigma$ .

Оскільки  $\phi$  не залежить від  $\lambda$ , а  $\sigma = \phi \cdot s$ , то спектр дії виділеної речовини  $\sigma(\lambda)$  за формою відповідає спектру його поглинання  $s(\lambda)$ . Тому, вимірявши (у розбавлених розчинах) за кривими, які характеризують дози випромінювання, спектр дії, можна визначати спектр поглинання речовини, що бере участь у процесі, не проводячи при цьому ніяких спектрофотометричних вимірів. Нехай у такий спосіб отримано спектр дії фотоінактивації деякого ферменту. Порівнявши його форму з формою спектрів поглинання *хромофорів*, які містяться в білку, можна за збігом форми виділити той хромофор, що відповідає за фотоінактивацію ферменту. У такий спосіб з'являється можливість ідентифікації підсистем клітин і бактерій, які відповідають за інактивацію.

Прогрес у фотобіологічних дослідженнях дозволив визначити найбільш типові порушення в структурі біологічних молекул, які відповідальні за фотоінактивацію. Це насамперед порушення в ядерному матеріалі клітин, а потім у біологічно важливих молекулах, амінокислотах і ліпідних оболонках:

## **2. Механізми дезінфекції біоб'єктів УФ випромінюванням**

УФ випромінювання з бактерицидного діапазону 205-315 нм завжди справляє бактерицидну дію, яке полягає в поглинанні УФ фотонів молекулами ДНК всередині клітини, розривом зв'язків в молекулі ДНК і утворенням нових зв'язків, в результаті чого мікроорганізм втрачає здатність до відтворення. Крива ефективності бактерицидної дії УФ випромінювання в залежності від довжини хвилі добре узгоджується з кривою поглинання УФ випромінювання молекулами ДНК. Максимум цієї кривої знаходиться в області 265 нм, тому випромінювання ртутних ламп низького тиску з довжиною хвилі 254 нм має високу бактерицидну ефективність. Число тих, що вижили мікроорганізмів  $N$ , падає за законом експоненти з ростом отриманої енергії (бактерицидної дози  $D$ ),  $N = N_0 \exp(-kD)$ , де  $N_0$  - число початкових мікроорганізмів,  $k$ - константа, що характеризує ступінь чутливості

даного виду мікроорганізму до дії УФ опромінення. Величина УФ дози, необхідної для десятикратного зменшення, залежить від виду мікроорганізму і для багатьох бактерій і вірусів лежить в області 2-20 мДж/см<sup>2</sup>. Для більшості практичних застосувань величина бактерицидної дози  $D$  визначається не піковим значенням інтенсивності випромінювання, а інтегралом бактерицидної опромінення  $E(\lambda, t)$  за часом дії  $t$ :

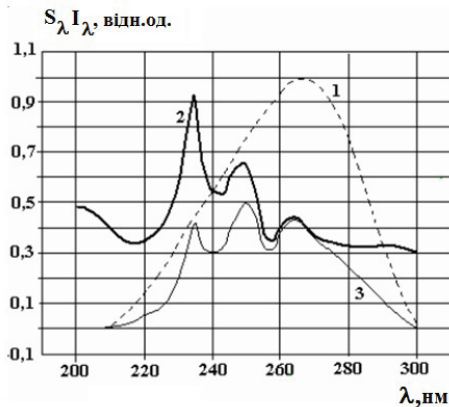
$$D = \iint E(\lambda, t) S(\lambda) d\lambda dt, \quad (8)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі,  $S(\lambda)$  - відносна бактерицидна ефективність в залежності від довжини хвилі. На рис. 1 показано приклад визначення бактерицидної ефективності імпульсної ксенонової лампи  $S_{\lambda} I_{\lambda}$ , а також наведені відносна спектральна крива бактерицидної дії  $S_{\lambda}$  і розподіл енергії випромінювання по спектру імпульсної ксенонової лампи в діапазоні 200-300 нм  $I_{\lambda}$ .

### **3. Імпульсний перегрів мікроорганізмів.**

Питання про відмінності впливу імпульсного випромінювання в порівнянні з неперервним досліджувався в різних країнах світу (США, Німеччині, Японії, Канаді). Перші дослідження процесу дезінфекції потужними імпульсними лампами були виконані в Японії, а імпульсна технологія була запатентована в 1984 році. У ранніх працях зроблено припущення, що при потужному імпульсному впливі в процесі дезінфекції бере участь не тільки УФ випромінювання, але і видиме світло. Однак через 15 років було доведено, що в процес знезараження імпульсним випромінюванням основним є внесок УФ фотонів.

До теперішнього часу встановлено, що імпульсне випромінювання має бактерицидну дію і механізм його впливу на мікроорганізми залежить від пікової щільності потужності УФ випромінювання, причому для кожного виду мікроорганізмів існує своє значення порогової пікової потужності. Згідно з сучасними даними, механізм дезінфекції імпульсним випромінюванням має дві складові: одна з них – загальновідомий вплив бактерицидного УФ випромінювання, інша – руйнування мікроорганізму в результаті його перегрівання при поглинанні всього УФ випромінювання.

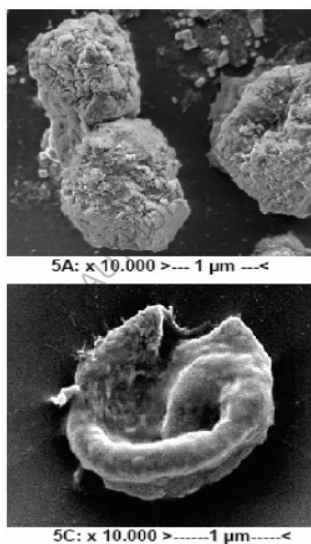


**Рис. 1.** Визначення бактерицидної ефективності імпульсної ксенонової лампи  $S_{\lambda} I_{\lambda}$ . 1 – відносна спектральна крива бактерицидної дії  $S_{\lambda}$ , 2 – розподіл енергії випромінювання по спектру імпульсної ксенонової лампи в діапазоні 200-300 нм  $I_{\lambda}$ , 3 – бактерицидна ефективність  $S_{\lambda} I_{\lambda}$ .

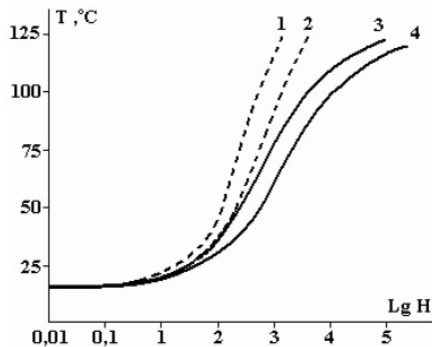
При піковій щільності потужності УФ випромінювання нижче порогової, знезараження визначається тільки УФ випромінюванням бактерицидного діапазону 205-315 нм, а ступінь знезараження залежить від інтегральної бактерицидної дози згідно формули (8).

При високій щільності імпульсного випромінювання, коли сумарна щільність потужності УФ випромінювання в спектральних діапазонах А, В, С (200-400 нм) вища за порогову, швидкість підведення променевої енергії перевищує швидкість скидання теплової енергії мікроорганізмом в навколишнє середовище, і відбувається перегрівання мікроорганізму, що і приводить до його дезінтеграції. Експериментально показано, що випромінювання у видимій області спектру не дає істотного внеску в нагрівання мікроорганізмів. Рівень необхідної щільності потужності залежить від термостійкості мікроорганізмів та їх навколишнього середовища. Для стабільної дезінтеграції необхідне нагрівання до температури більшої за 130°C, при якій відбуваються незворотні зміни, аж до закипання рідини всередині мікроорганізму і викиду її назовні. Приклад такого руйнування представлений на рис. 2 при опроміненні спор цвілі *Aspergillus*

Niger двома імпульсами з піковою щільністю УФ випромінювання  $33 \text{ кВт} / \text{см}^2$ . Добре видно розірвана порожня оболонка цвілі. Згідно з розрахунками, для імпульсного нагрівання до таких температур бактерій e-солі необхідно отримувати пікову щільність потужності через опромінення оброблюваної поверхні в повітрі ( $10^3 \text{ Вт} / \text{см}^2$ ) і в воді ( $10^4 \text{ Вт} / \text{см}^2$ ) (рис. 3). Нагрівання починає позначатися вже при значеннях густини потужності  $10^2 \text{ Вт} / \text{см}^2$  в повітрі і  $10^3 \text{ Вт} / \text{см}^2$  в воді, оскільки для багатьох мікроорганізмів нагрівання до температури  $70^\circ\text{C}$  є критичним. Перегрівання залежить від властивостей навколишнього середовища. Для води потужності випромінювання повинні бути вище, оскільки теплопередача від мікроорганізму в воді вище, ніж в повітрі.



**Рис. 2.** Вплив імпульсного випромінювання на бактерію *Aspergillus Niger*. На світлинах вказано масштаб. 5A – вихідна бактерія. 5C – одиночна бактерія *Aspergillus Niger* після впливу двох імпульсів УФ-випромінювання з піковою потужністю  $33 \text{ кВт}/\text{см}^2$ . Вершина бактерії розірвана перегрітою внутрішньоклітинної рідиною, яка вилетіла з бактерії назовні.



**Рис. 3.** Розраховані температури нагрівання для бактерії E-coli в залежності від пікової щільності потужності  $H$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ) УФ випромінювання в повітрі (1, 2) і в воді (3,4) для імпульсів з тривалістю: 100 (1 і 3) і 1 мс (2 і 4).

Основний внесок в нагрівання мікроорганізмів дає УФ випромінювання, а не видиме чи інфрачервоне випромінювання. Це пов'язано з тим, що УФ випромінювання поглинається на меншій глибині, ніж видиме або інфрачервоне, а також з тим, що при розмірах мішені мікрон і менше на процеси розсіювання і поглинання фотонів впливає хвильова природа світла, довгохвильові фотони будуть більше розсіюватися і огинати мікрочастинок, ніж УФ фотони. Експериментально показано, що імпульсного перегріву і руйнування мікроорганізмів можна досягти і при використанні тільки м'якого УФ випромінювання з областей А і В (280-400 нм), якщо його інтенсивність вища порогової. Це дозволяє забезпечити дезінфекцію без застосування жорсткого бактерицидного УФ випромінювання з області С (200-280 нм).

#### **4. Основні фізичні методи дезінфекції. Фільтрація**

Найбільш раннім з фізичних методів є нагрівання, яке в даний час, в основному, використовується для дезінфекції та стерилізації медичних інструментів і обладнання спеціального призначення, наприклад, стерилізація космічних апаратів, що відправляються на інші планети. Обмеження методу пов'язані з термічною стійкістю оброблюваних зразків або з їх великими розмірами. Для цих же цілей застосовують і жорстке гамма-

випромінювання, однак цей метод має ще більше обмежень. Для знезараження повітря і води на даний час використовують переважно відомі і випробувані методи: фільтрація, озонування та вплив ультрафіолетовим випромінюванням.

Чисте повітря – середовище, що не підтримує розмноження мікроорганізмів; це визначається відсутністю поживних речовин і нестачею вологи. Крім того, в повітрі більш виражено бактерицидну дію сонячних променів УФ-спектру. Життєздатність мікроорганізмів в повітрі забезпечують зважені частинки води, слизу, пилу і фрагментів ґрунту. В даний час загальноприйнятою є точка зору про те, що мікроорганізми в повітрі замкнутих приміщень знаходяться в вигляді бактеріального аерозолу - колоїдної системи, що складається з газоподібного середовища (повітря), в якій знаходяться дрібні крапельки рідини або частки твердої речовини, з укладеним в них заразним матеріалом (віруси, мікроорганізми).

Бактеріальний аерозоль складається з трьох досить чітко розмежованих фаз, а саме: тверді частинки, крапельна фаза, що містить великі інфіковані краплі слини або слизу розміром більше 100 мкм, і крапельно-ядерна розміром меншим за 100 мкм. Основна кількість небезпечних мікроорганізмів надходить в повітря від людини, тварин і продуктів їх життєдіяльності. Патогенні мікроорганізми викидаються в повітря разом із середовищем, в якій вони знаходяться. Наприклад, при розмові виділяється до 800 часток на хвилину, при одноразовому чханні - в середньому 40000. Це справедливо і по відношенню до патогенних мікроорганізмів, що потрапляють в повітря від хворих людей і інших бацілоносців.

При очищенні повітря в тій чи іншій мірі відбувається і його знезараження. Фізично видаляючи частинки з обсягу різними способами, наприклад, фільтруванням, або окислюючи хімічно шкідливі компоненти в обсязі і на поверхні, чи сорбуючи ті або інші домішки, ми завжди знижуємо і концентрацію мікроорганізмів в повітряній суміші. У цьому сенсі вентиляція є одним з методів очищення і знезараження повітря в приміщенні.

Знезараження повітря шляхом фільтрації дозволяє знизити концентрацію мікроорганізмів в приміщенні до прийнятого рівня. Це досить простий і ефективний метод для певних умов.

Для видалення дрібних частинок пилу з повітря використовують два основні методи. Перший, це коли очищення здійснюється за допомогою розміщеного поперек потоку повітря волокнистого або пористого матеріалу (так звані механічні фільтри), і другий, коли захоплення частинок виробляється електричним полем з подальшим їх осадженням (електрофільтр). Наприклад, високоефективний механічний фільтр (НЕРА-фільтр) призначений для уловлювання частинок з розмірами 2 мкм і менше. Фільтрувальне середовище такого фільтра виконана зі скляних волокон з діаметрами в діапазоні 0,1-10 мкм, причому відстань між волокнами, як правило, набагато більше розмірів частинок, що вловлюються.

Фільтр систем, наповнювачі та методи фільтрації безперервно вдосконалюються. Нові фільтри із застосуванням фільтрувальних полімерних волокон нанометрових розмірів здатні вловлювати пилові частинки і мікроорганізми з розмірами меншими за 1 мкм. Такі фільтри дорогі, мають невеликий ресурс, створюють великий опір повітряному потоку, однак дозволяють проводити тонку фільтрацію.

Електрофільтри широко використовуються для видалення пилу в технологічних процесах вже понад століття. В електрофільтрах заряджені мікрочастинки в електричному полі притягуються до електрода іншого знаку (осаджувальний електрод). Зарядка мікрочастинок може відбуватися як внаслідок тертя об повітря в електричному полі або за допомогою додаткового пристрою. Фільтри з електростатичним зарядом на самому фільтрі або на частинках мають низьку вартість, але і низьку ефективність. Двокаскадні електрофільтри містять каскад зарядки частинок, зазвичай за допомогою коронного розряду, і каскад осадження. Електроди в каскаді осадження можуть бути у вигляді металевих пластин, розміщених паралельно потоку, причому електричне поле між пластинами направлено перпендикулярно потоку повітря. Заряджені частинки в електричному полі рухаються перпендикулярно повітряному потоку і осідають на пластинах. У міру накопичення пилу осаджувальні пластини слід чистити або струшувати з них пил.

В інших конструкціях каскад збору складається з декількох пористих електродів, на які подано напругу, між ними можуть



бути розташовані пористі ізоляційні пластини, наприклад, зі спіненого поліуретану. Всі ці пластини розташовані поперек повітряного потоку і перекривають всі перетини. В цьому випадку захоплені мікрочастинки знаходяться в глибині пористих електродів або пористих діелектричних пластин, і, як правило, очищення таких пластин не передбачена, а виробляється їх заміна. Розташовані поперек потоку пористі пластини призводять до значного перепаду тиску, і як наслідок до збільшення потужності вентилятора.

## **5. Вплив ультрафіолетового випромінювання**

Інактивація мікроорганізмів УФ-випромінюванням давно є загально визнаним фізичним методом з високою ефективністю. Для знезараження УФ-випромінюванням часто використовують відкриті опромінювачі, оскільки ефективність використання бактерицидного потоку ультрафіолетового випромінювання лампи в цьому випадку найбільш висока. В даний час для знезараження повітря і поверхонь спостерігається тенденція застосування все більш потужних УФ-опромінювачів, що забезпечують високі дози випромінювання за короткий час обробки. Поодинокі потужності таких систем становлять від сотень ватів до декількох кіловат.

Знезараження УФ-випромінюванням з використанням амальгамних і ртутних ламп низького тиску є екологічно безпечним, економічним і зручним в експлуатації методом, який поєднує в собі високу ефективність знезараження, відсутність шкідливого впливу на повітря, низькі експлуатаційні витрати, простоту експлуатації і компактність УФ-установок. Джерела УФ-випромінювання можна використовувати як для обробки повітря у всьому приміщенні, так і в закритих рециркуляторах. Обробка поверхонь УФ-випромінюванням також є ефективним способом, проте, на відміну від повітря, доза УФ-випромінювання може сильно залежати від виду і стану поверхні, оскільки мікроорганізми можуть бути захищені біологічними складовими, наприклад, слизом, в результаті чого в більшості випадків необхідна доза енергії УФ-випромінювання може значно вирости.

Що стосується знезараження води, то за останні 20 років УФ-технологія досягла такого високого рівня, що практично завжди є основою. В даний час в усьому світі технологію хлорування

питних і стічних вод міняють на технологію УФ-знезараження, а озонування в багатьох випадках є попередньою стадією перед етапом УФ-знезараження.

Останнім часом з'явилися пропозиції використовувати для знезараження імпульсні ксенонові лампи з піковою потужністю імпульсу випромінювання 5-10 МВт, в спектрі випромінювання яких міститься значна частка УФ-випромінювання. Оскільки пікова потужність імпульсу випромінювання ксенонової лампи може становити 3-10 МВт, то виникає природне запитання, чи є відмінності при бактерицидній обробці середовищ УФ-випромінюванням такої імпульсної лампи і звичайних ртутних ламп. Широкий спектр імпульсного розряду ставить також питання - чи впливає на процес знезараження імпульсне випромінювання видимого діапазону. До теперішнього часу встановлено, що імпульсне випромінювання має бактерицидну дію, і що механізм його дії на мікроорганізми залежить від пікової щільності потужності УФ-випромінювання, причому для кожного виду мікроорганізмів існує своє значення порогової пікової потужності.

Обробку імпульсним УФ-випромінюванням умовно можна розділити на два діапазони: 1) якщо опромінення набагато нижче порогового значення  $1 \text{ кВт/см}^2$ , то це діапазон низького рівня опромінення, де працює тільки традиційний механізм руйнування молекул ДНК; 2) при опроміненні з густиною потужності вищою за  $5-10 \text{ кВт/см}^2$ , відбувається перегрів мікроорганізму і його термічне руйнування. Такі високі потужності опромінення можна створити імпульсними ксеноновими лампами на відстанях від оброблюваних поверхонь не більше за 10-50 см, тому воно вже застосовується для дезінфекції медичних препаратів, розчинів та інструментів, харчових продуктів, пакувальних матеріалів і різних поверхонь для харчової, медичної, парфумерної промисловості.

При зазначеному умовний розподіл, природно, є і проміжна область імпульсної опромінення. У цій області термічна деструкція не відбувається, однак, якщо потужність ще досить висока, то поглинання УФ-випромінювання зовнішніми мембранами протейінових клітин в підсумку може призводити до пошкодження біологічних мембран і порушення синтезу раз-особистих компонентів мембран і клітинної оболонки, а потім і до

загибелі клітини. Крім руйнувань в ДНК і РНК, УФ-випромінювання також викликає фотохімічні реакції в білках, ферментах та інших молекулах всередині клітини. Поглинання білка має локальний максимум близько 270-280 нм, а при довжинах хвиль нижче 240 нм ефективний переріз поглинання білків зростає. Інші біологічні молекули з ненасиченими зв'язками можуть також бути сприйнятливими до УФ-впливу. Всі ці фактори сприяють підвищенню ефективності імпульсного УФ-випромінювання. Істотним недоліком застосування імпульсного випромінювання в цьому діапазоні імпульсної потужності є відсутність експериментальних даних, що дозволяють виявити механізми впливу і визначити критерії для їх реалізації, а також велика невизначеність ефективності впливу на мікроорганізми різних типів.

При імпульсній потужності в зоні знезараження нижче порогової, імпульсні джерела УФ-випромінювання можуть бути використані аналогічно звичайним бактерицидним лампам. В цьому випадку бактерицидна дія залежить від частки УФ-випромінювання бактерицидного діапазону з урахуванням бактерицидної ефективності.

Розглянемо порівняння ефективності знезараження установки з традиційними ртутними лампами низького тиску і обладнання з імпульсною ксеноновим лампою. В силу того, що споживана потужність і конструктивні особливості установок різні, вони тестувалися по заявленим паспортним параметрам: час опромінення і умови роботи. При однакових умовах була досліджена ефективність УФ-опромінювачів з імпульсною ксеноновим лампою і постійного УФ-С опромінення на відстані 122 см і часу впливу 10 хвилин. Досліджувалася інактивація бактерій *Clostridium difficile*, метицилін-стійких *Staphylococcus aureus* (MRSA), а також *Enterococcus* (VRE), нанесених на предметне скло, і оцінювався вплив концентрації патогенних мікроорганізмів, відстані від пристрою, додаткового органічного навантаження, а також ефективність знищення патогенів при захисті предметного скла від прямого джерела опромінення. Як виявилось, на предметних стеклах постійне УФ-С випромінювання дозволило досягти більшого зниження початкової кількості мікроорганізмів, ніж при використанні

імпульсного випромінювання ксенонової лампи. Ефективність знезараження постійним УФ-С випромінюванням була вищою, ніж імпульсним випромінювачем: для бактерії *Clostridium difficile* - в 3 рази, для MRSA - на порядок, для VRE - на 3 порядки. Аналіз цих результатів (в припущенні, що ККД генерації бактерицидного УФ-випромінювання ксенонової лампою становить 10-15%, що підтверджується численними дослідженнями і сертифікатами на ксенонові лампи, які випускаються світовими виробниками, а енергоспоживання установки з ртутною лампою орієнтовно вдвічі більше) призводить до висновку, що отримані відмінності в ефективності знезараження цілком пояснюються традиційним механізмом впливу УФ-випромінювання на ДНК.

Отже, в разі застосування імпульсного УФ-випромінювання для знезараження повітря і поверхонь в приміщеннях, за умов низьких рівнів опромінення на великих відстанях, у ксенонових ламп немає ніяких переваг у порівнянні з традиційними ртутними і амальгамними лампами низького тиску. Якщо ж за умовами експлуатації жорстко потрібно обладнання без ртуті, то імпульсне обладнання може забезпечити необхідну бактерицидну ефективність знезараження, проте його вартість висока при відносно низькому ресурсі. Остаточний вибір обладнання повинен визначитися конкретним завданням і економічною доцільністю.

### **Озонування**

Озонування за своєю природою формально є хімічним методом, оскільки використовується сильний окислювач озон. Але через те, що озон є нестабільним з'єднанням, його необхідно синтезувати безпосередньо на об'єкті знезараження за допомогою електричного розряду. Тому такий метод також можна віднести до фізичних методів.

Озон є отруйною речовиною, тому озонування приміщень можливо тільки при відсутності людей, або такий метод застосовують в екстрених випадках, або при сильному зараженні повітря і поверхонь. На відміну від інших дезінфікуючих речовин, озон не утворює отруйних продуктів і швидко розкладається, тому при його застосуванні не потрібна додаткова обробка приміщення.

Застосування озонаторів для знезараження повітряного середовища і поверхонь дає непогані результати по мікробіології.

Однак слід враховувати, що в цьому випадку необхідна концентрація озону багаторазово перевищує гранично допустиму концентрацію (ГДК) в атмосферному повітрі (0,03 мг/см<sup>3</sup>). Це накладає додаткові обмеження на способи застосування такої обробки, до того ж наявність надлишкового озону може привести до утворення в навколишньому середовищі формальдегідів.

Підсумовуючи вище сказане, одержимо, що на даний час для ефективного знезараження можна застосовувати ряд різних фізичних методів. Для знезараження води технологія УФ-опромінення поки є найбільш ефективною, безпечною і економічною.

Проблема знезараження повітря в місцях масового скупчення людей стає все більш актуальною, оскільки повітряно-крапельні інфекції можуть поширитися протягом декількох годин або діб в більшості розвинених країн пасажирами літаків і швидкісних поїздів. Внаслідок цієї загрози удосконалюються відомі методи знезараження повітря і з'являються нові. Найбільш ефективною є багатобар'єрних система очищення і знезараження повітря.

За останнє десятиліття значно підвищилася потужність і надійність бактерицидних амальгамних УФ-ламп низького тиску, тому метод знезараження повітря УФ-випромінюванням є надійним, простим і ефективним методом. Проблема забезпечення ефективного знезараження повітря приміщень за допомогою УФ випромінювання може бути вирішена двома шляхами:

- застосування припливно-витяжної вентиляції з бактерицидними УФ модулями в системі повітроводів, що забезпечують достатню і постійну подачу в приміщення очищеного і знезараженого повітря;
- обробка приміщення, до початку його функціонування, за допомогою відкритих УФ опромінювачів з подальшим використанням УФ рециркулятор достатньої продуктивності, які працюють в процесі всього часу перебування людей в приміщенні. Це забезпечить безперервний процес знезараження повітря.

### Контрольні запитання

1. В чому полягають переваги знезараження повітря і води під дію УФ-випромінювання та озонуванням від знезараження хімічними дезінфекторами ?
2. Охарактеризуйте терміни «дезінфекція», «стерилізація», «інактивація».
3. Що характеризує коефіцієнт супротиву біологічних культур дії УФ-випромінювання ?
4. Що називають ступенем знезараження біологічних культур?
5. Охарактеризуйте терміни «спектр дії випромінювання», «ефективний переріз зіткнення», «поперечний переріз фотохімічної реакції» та зв'язок між ними.
6. Яким є механізми дезінфекції біологічних об'єктів під дією неперервного та імпульсного УФ-випромінювання?
7. В чому полягає сутність імпульсного перегрівання мікроорганізмів під дією інтенсивних потоків електромагнітного випромінювання ?
8. Охарактеризуйте фільтрацію забрудненого повітря.
9. В чому полягає сутність озонування води, повітря та забруднених поверхонь ?

### **ТЕМА–3. УЛЬТРАФІОЛЕТОВІ ЛАМПИ І ОСВІТЛЮВАЧІ ДЛЯ ЗАСТОСУВАНЬ В БІОМЕДИЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ**

Відомо, що ультрафіолетовий діапазон природного сонячного світла, який знаходиться між довжинами хвиль 200-400 нм і складається з хвиль трьох основних діапазонів:

**A (UVA)** з довжиною хвилі 315-400 нм,

**B (UVB)** з довжиною хвилі 280-315 нм,

**C (UVC)** з довжиною хвилі 200-280 нм.

Світлові хвилі діапазону **C** викликають незворотні руйнування в клітинах живих організмів. Тому вони вважаються смертоносними. На щастя, озоновий шар планети практично повністю затримує ці хвилі.

#### **1. Характеристики ультрафіолетових ламп на парах ртуті**

**Ультрафіолетова лампа** – це штучне джерело ультрафіолетового випромінювання тобто електрична лампа, яка випромінює невидимі людському оку ультрафіолетові хвилі. За методом отримання ультрафіолетового випромінювання лампи можна розділити на два види: лампи низького тиску та лампи високого тиску. Їх назва визначає спосіб їх виготовлення і принцип їх роботи.

Основними чинниками, що визначають ефективність джерел УФ випромінювання, є: бактерицидна ефективність, бактерицидний потік лампи, ресурс роботи, падіння бактерицидного потоку до кінця терміну служби лампи, компактність і вартість блоку запуску та живлення, безпека і технологічність використання джерела бактерицидного випромінювання.

Застосування бактерицидних газорозрядних ламп, в яких основним випромінюють елементом є атом ртуті, обумовлено тим, що він має резонансний електронний перехід з довжиною хвилі випромінювання 253,7 нм, що близька до максимуму кривої бактерицидної чутливості. У ртутних і амальгамних лампах низького тиску ККД перетворення вкладеної в лампу електричної енергії у випромінювання на довжині хвилі 253,7 нм досягає 35-50%, що становить понад 90% всього УФ випромінювання. У цих

джерелах тиск інертного газу становить 800-5000 Па, а тиск парів ртуті - 10-15 Па. Амальгамні лампи, завдяки триразово підвищеній погонній потужності УФ випромінювання в порівнянні з ртутними лампами низького тиску дозволяють ефективно вирішувати завдання бактерицидної обробки повітря, води і поверхонь. Використання електронних компактних блоків живлення, які працюють на частоті 20-50 кГц, дозволило підвищити ККД системи лампа-блок живлення, збільшити термін служби лампи до 16000 годин і варіювати електричну потужність лампи в процесі її роботи. Високий бактерицидний ККД, зручність роботи з такими системами живлення, ресурс більший за 1000-16000 годин і відносна дешевизна призвели до широкого використання ртутних і амальгамних ламп низького тиску.

**УФ-лампа низького тиску** (закордонне назва "HD" (Hohe Drucken; рис.1) – електрична лампа ультрафіолетового діапазону, робота якої заснована на принципі тліючого розряду в газах\*.

\*Одним з основних типів газового розряду, що формується, як правило, при низькому тиску і малому струмі, є повздовжній тліючий розряд. Головні чотири області розрядного простору, характерні для тліючого розряду, це: 1 – катодний темний простір; 2 – тліюче світіння; 3 – фарадеевий темний простір; 4 – позитивний стовп.



**Рис.1.** Вигляд ультрафіолетових ртутних ламп низького тиску, які серійно випускаються промисловістю.

Області 1-3 знаходяться поблизу катода і утворюють катодну частину розряду, в якій відбувається різке падіння потенціалу (катодного падіння), що пов'язана з великою концентрацією



позитивних іонів на кордоні областей 1-2. В області 2 електрони, прискорені в області 1, спричиняють інтенсивну ударну іонізацію. Тліюче світіння плазми обумовлене рекомбінацією іонів і електронів в нейтральні атоми або молекули.

Лампа низького тиску являє собою подовжену скляну колбу, як правило, у вигляді циліндра, на кінцях якої знаходяться металеві або пластмасові цоколі. Зовні вона нічим не відрізняється від звичайної люмінесцентної лампи денного світла. Лампа заповнена інертним газом і парами ртуті. Внутрішня поверхня ламп низького тиску покрита рівномірним шаром люмінофора. Охолодження таких ламп відбувається дуже швидко, і через 1-2 хвилини після виключення вони знову готові до роботи. У початковий момент (близько 30 годин) лампа працює з підвищеною до 7% віддачею потужності.

Спектр випромінювання ламп низького тиску знаходиться в області від 280 до 400 нм. Світіння одержується за рахунок тліючого розряду між двома електродами лампи. Діапазон споживаної потужності ламп низького тиску знаходиться в діапазоні 5-180 Вт.

Всередину лампи закачується інертний газ під невеликим тиском ( $p = 50 - 150$  Па) і пари ртуті, які при кімнатній температурі можуть осідати дрібними крапельками ртуті в рідкому стані. Оскільки газ знаходиться під низьким тиском, то це і пояснює назву лампи.

Потужність ультрафіолетового випромінювання ламп становить, як правило, близько 20% від споживаної ними електричної потужності.

Основні частини лампи низького тиску: кварцова скляна трубка, металеві або цоколі з штирковими роз'ємами, молібденові струмопровідні нитки і шар люмінофора.

**Фізика роботи лампи низького тиску.** Для запуску лампи потрібен "імпульс запалювання". Він одержується шляхом створення на протилежних електродах імпульсної напруги пробою. Для цього використовується пристрій запуску – стартер. Стартери виробляються різних номіналів і призначені для використання тільки з тими лампами, для яких вони призначені.

Після пробою в лампі виникає тліючий розряд (для обмеження струму, що протікає в ланцюзі живлення лампи

включені дроселі). При неправильно обраних параметрах ланцюга живлення (невідповідність напруги і сили струму рекомендованим номіналам), може статися вихід з ладу всієї системи з перегоранням лампи, стартерів і дроселів.

Після запалювання тліючого розряду температура всередині лампи дещо підвищується. Це приводить до того, що ртуть, яка перебуває при кімнатній температурі в рідкому стані, починає випаровуватися. При повному випаровуванні ртуті всередині колби лампи створюється оптимальна концентрація парів ртуті. Час випаровування ртуті може тривати до 3 хвилин. Тільки після цього лампа починає працювати з повною світловою віддачею.

**Процес отримання ультрафіолетового випромінювання в лампі низького тиску.** Електрони, що летять від одного електрода до іншого, на своєму шляху стикаються з атомами ртуті, і, віддаючи їм свою енергію, переводять електрон атома ртуті в збуджений стан. Оскільки час знаходження електрона в збудженому стані малий, то він повертається назад в основний стан з випромінюванням фотона світла короткої довжини хвилі. Одержаний фотон поглинається люмінофором, і вже атом люмінофора випромінює заявлене в характеристиках лампи ультрафіолетове випромінювання. Таким чином, в роботі лампи тліючого розряду істотну роль грає хімічний склад і кількість нанесеного люмінофора.

Лампи на парах ртуті з накачуванням дуговим розрядом при високому тиску парів ртуті ( $p=103-105$  Па) мають більш низький ККД в області бактерицидного УФ випромінювання – 15%, а з урахуванням кривої бактеріальної ефективності це значення знижується до 10-11%. Практично всі бактерицидні ртутні лампи високого тиску, що серійно випускаються промисловістю, випромінюють УФ випромінювання з довжиною хвилі меншою 200 нм, що приводить до напрацювання високотоксичного озону. Ртутні лампи низького тиску виготовляють в основному з боросилікатного скла або спеціальних сортів кварцу, які не пропускають короткохвильове випромінювання і виключають напрацювання озону, що вигідно відрізняє їх від озонотворюючих ламп.

**УФ-лампа високого тиску** (Закордонне назва "ND" (Nieder Drucken) – електрична лампа ультрафіолетового діапазону робота, якої заснована на принципі дугового розряду в газах \*.

\*При збільшенні розрядного струму звичайний тліючий розряд стає аномальним і починається стягування (контрагування) його позитивного стовпа. Стовп відривається від стінок посудини, в ньому починає відбуватися додатковий процес втрати заряджених частинок (рекомбінація в об'ємі). Передумовою цього є висока густина заряджених частинок. При подальшому підвищенні розрядного струму газ нагрівається настільки, що стає можливою його термічна іонізація. Зіткнення між атомами або молекулами в цьому випадку настільки сильні, що відбувається відрив електронів від атома. Такий розряд називається дуговим. Із зростанням струму електропровідність стовпа плазми підвищується, вольт-амперна характеристика дугового розряду має падаючий характер. Слід зазначити, що хоча дуговий розряд може «горіти» в широкому діапазоні тисків газу та інших умов, але в більшості випадків він спостерігається при тиску порядку атмосферного.

У розрядну колбу лампи високого тиску закачані інертний газ і ртуть під великим тиском. Тут використовується метод отримання ультрафіолетового випромінювання за допомогою дугового розряду. При дуговому розряді відбувається сильне нагрівання лампи, тому час на її охолодження більший, ніж у ламп низького тиску (від 3 до 5 хвилин).

Лампа випромінює потужне ультрафіолетове випромінювання як в діапазоні А, так і в діапазоні В і у шкідливому для всього живого, діапазоні С. Використання таких ламп з зіпсованими або розбитими фільтрами категорично забороняється через можливе завдання шкоди для здоров'я персоналу. Для отримання потрібної спектральної густини випромінювання до складу газу, що наповнює лампу, вводяться спеціальні добавки (пари ртуті, заліза, галію і т.д.). Потужність ультрафіолетового випромінювання таких ламп може становити від 90 -1500 W.

Цей тип ламп має високу світлову віддачу. Сучасні лампи можуть проводитися із загальною споживаною електричною

потужністю до 10000 Вт. Спектр випромінювання розташований в області від 100 нм до 380 нм.

Конструкція лампи складається з: скляного корпусу, електродів, керамічних цоколів і молібденової майданчика.

**Фізика роботи ламп високого тиску.** Для запуску лампи потрібно "імпульс запалювання". Він з'являється шляхом створення на протилежних електродах імпульсної напруги пробою. Для цього використовується пристрій запуску – помножувач напруги.

Після пробою в лампі виникає дуговий розряд (для обмеження струму, що протікає в ланцюзі живлення лампи включені дроселі). При неправильно обраних параметрах живильного ланцюга може статися вихід з ладу всієї системи.

Після виникнення дугового розряду температура всередині лампи підвищується. Це приводить до того, що ртуть, яка перебуває при кімнатній температурі в рідкому стані, починає випаровуватися. При повному випаровуванні ртуті всередині колби лампи створюється оптимальна концентрація її парів. Температура всередині колби піднімається ще вище, і додаткові присадки металів, що знаходяться в ній, переходять в газоподібну форму. Даний процес називається *фазою розбігу лампи*.

**Процес отримання ультрафіолетового випромінювання в лампі.** Електрони, які летять від одного до іншого електрода, на своєму шляху стикаються з атомами ртуті і, віддаючи їм свою енергію, переводять електрон атома ртуті на збуджений енергетичний рівень. Так як час знаходження електрона в збудженому стані невеликий (близько 10 нс), то він повертається назад в основний стан з випромінюванням фотона світла. Таким чином, в лампі створюється ультрафіолетове випромінювання в діапазоні від 100 до 380 нм.

За рахунок додавання в газову суміш різних присадок виробники можуть змінювати спектральну щільність вихідного випромінювання. Проходячи через скло колби, випромінювання лампи проходить первинну фільтрацію і має в своєму спектральному складі тільки ультрафіолетове випромінювання діапазону А і В. Причому співвідношення потужності випромінювання діапазону А до В становить приблизно 4: 1. Без

застосування спеціальних додаткових фільтрів використовувати це випромінювання неприпустимо.

Як правило, більшість ламп низького тиску випускаються з терміном служби 600-800 годин. Термін служби лампи визначається інтервалом часу від початку експлуатації до досягнення лампою 30 відсоткової втрати потужності ультрафіолетового випромінювання.

Зміна ламп повинна бути проведена при значеннях її параметрів на 30% менших від тих, які зазначені в заводській специфікації. При правильній експлуатації лампи це значення досягається через 500-800 годин роботи лампи. Ці цифри позначають термін служби ламп, і обов'язково повинні вказуватися виробником ламп.

**Основні поняття і характеристики ультрафіолетових ламп. Потужність ультрафіолетової лампи.** Саме про цю потужності йдеться, коли говорять про потужність лампи. Потужність лампи – електрична потужність, що витрачається на отримання в лампі заданого рівня ультрафіолетового випромінювання. Це визначення зустрічається в технічних характеристиках лампи, коли заходить мова про загальну споживану потужність. Також це визначення застосовується як обов'язковий елемент в маркуванні ультрафіолетових ламп. Одиниця виміру – Ватт (Вт.).

Рідше можна зустріти поняття «Потужність ультрафіолетового випромінювання лампи». Це, власне і є сумарна потужність випромінювання у всьому діапазоні ультрафіолетового випромінювання (UVA + UVB + UVC). Одиниця виміру також Ватт (Вт.). Потужність ультрафіолетового випромінювання для сучасних ламп підсумовується з двох складових:

- спектральна щільність ультрафіолетового випромінювання – потужність ультрафіолетового випромінювання лампи в інтервалі довжини хвилі одиничної ширини;

- потік ультрафіолетового випромінювання – кількість енергії ультрафіолетового випромінювання, падаюче на одиницю поверхні. Одиниця виміру – Вт/см<sup>2</sup>.

**Термін експлуатації (служби) ультрафіолетових ламп.** Термін експлуатації лампи – інтервал часу від моменту початку

експлуатації лампи до моменту досягнення лампою 30 відсоткової втрати потужності ультрафіолетового випромінювання. Слід враховувати, що в початковий момент (до 30 перших годин роботи), лампа працює з підвищеною – іноді до 15% - світловою віддачею. Застарілі моделі ламп мали стандартний термін експлуатації 500 годину. Сучасні розробки і технології дозволили виробляти якісніші лампи з терміном експлуатації до 800 і більше годин.

**Коефіцієнт UVB / UVA.** Коефіцієнт випромінювання діапазону В- виражене у відсотках відношення потужності ультрафіолетового випромінювання діапазону В до загальної потужності всього ультрафіолетового випромінювання. Оскільки в сучасних ультрафіолетових лампах С-випромінювання повністю відсутнє, то, коли мова йде про ультрафіолетові лампи, під коефіцієнтів випромінювання діапазону В слід розуміти виражене у відсотках відношення потужності ультрафіолетового випромінювання В до потужності ультрафіолетового випромінювання всієї лампи. Одиниця виміру - відсотки (%). Наприклад, якщо коефіцієнт лампи UVB / UVA, % дорівнює 2,3, то кількість ультрафіолетових променів діапазону В від загальної кількості ультрафіолетових променів, випромінюваних лампою становить 2,3%. Решта 97,7% припадають на ультрафіолетові промені діапазону А і т.д.

**Доза ультрафіолетового випромінювання.** Доза ультрафіолетового випромінювання – кількість енергії ультрафіолетового випромінювання, що падає на одиницю поверхні за одиницю часу. Одиниця виміру – Вт·с/см<sup>2</sup>. Саме цю величину і вимірюють компактні переносні вимірювачі, які використовуються для вимірів встановлених ламп. Коли доза ультрафіолетового випромінювання знижується на 30% від заводської, слід говорити про закінчення терміну служби лампи.

## **2. Імпульсні газорозрядні ксенонові лампи**

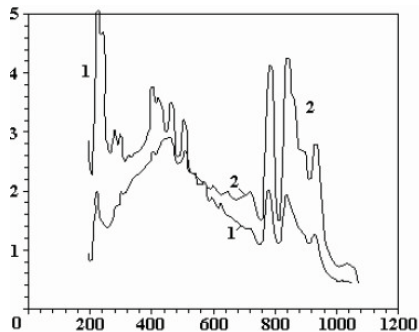
Основними перевагами імпульсних газорозрядних ксенонових ламп є велика пікова потужність в імпульсі, яка досягає 5-50 МВт при тривалості імпульсу 1-200 мкс і безртутне робоче середовище. Спочатку ксенонові лампи були розроблені для накачування твердотільних лазерів, а потім стали застосовуватися і для знезараження води, повітря та різних

поверхонь. Спектральний склад випромінювання залежить від густини розрядного струму (рис.2) і схеми включення лампи. На діапазон довжин хвиль від 200 до 300 нм припадає 25-30% усього випромінювання в діапазоні 100-1100 нм і 40% на весь УФ діапазон. Відповідно, їх бактерицидна ефективність складає 10-13% від сумарного випромінювання лампи. Ці результати узгоджуються з даними для ксенонових ламп типу ІФП-7/120 і ІФП-8000. З урахуванням втрат на пропускання колби лампи і теплових втрат бактерицидна ефективність складе  $\sim 10\%$  від вкладеної в лампу електричної енергії. Широкий спектр випромінювання імпульсних ксенонових ламп скоріше недолік, ніж перевага, оскільки його короткохвильова частина може призводити до небажаного утворення озону, до побічних хімічних реакцій і напрацювання шкідливих для людини з'єднань. Для зменшення інтенсивності випромінювання в короткохвильовій області спектра зменшують густину струму в лампі, пікова потужність випромінювання при цьому теж зменшується. Також використовують додаткові захисні плівки або спеціальні сорти кварцу. Але це значно збільшує вартість ламп і зменшує ресурс через поглинання УФ випромінювання кварцової колбою.

Термін служби імпульсних ксенонових ламп визначається числом спалахів, які може забезпечити лампа. Чим вище енергія імпульсу, тим менше число спрацьовувань лампи, яке варіюється від  $10^3$  до  $10^8$  імпульсів. Середня потужність лампи регулюється зміною частоти проходження імпульсів. При частоті спалахів 30 Гц і ресурсі  $10^8$  імпульсів отримуємо час безперервної роботи лампи менше 1000 годин. При практичному застосуванні імпульсних ламп падіння УФ випромінювання до кінця терміну служби складає 25-50%.

Для запалювання імпульсних ксенонових ламп використовують дві основні електричні схеми, в яких в якості накопичувача енергії служать імпульсні конденсатори. В одній схемі імпульсна лампа постійно підключена до конденсатора і до лампи постійно подається робоча висока напруга 1-5 кВ. Для отримання розряду на лампу від спеціальної схеми подається високовольний імпульс амплітудою 10-30 кВ, який ініціює електричний пробій. В іншій схемі між накопичувальним конденсатором і лампою знаходиться високовольний ключ,

наприклад іскровий розрядник або тиратрон. Використання комутатора збільшує вартість імпульсного джерела живлення і зменшує його ресурс.



**Рис.2** Спектр випромінювання імпульсної ксенонової лампи при густині струму 6,5 (1) і 1 кА/см<sup>2</sup> (2).

Таким чином, імпульсні джерела УФ випромінювання характеризуються високою (до 50 МВт) піковою потужністю, бактерицидною ефективністю УФ випромінювання близькою до 10%, терміном служби близьким до 1 000 год і громіздким високовольтним джерелом живлення. Лампи з високою питомою навантаженням, такі як ртутні лампи високого тиску і імпульсні ксенонові лампи, вимагають інтенсивного тепловідведення, що робить конструкцію обладнання на їх основі більш складної порівняно до обладнання з ртутними або амальгамними лампами низького тиску.

**Таблиця 1.**  
**Параметри ртутних і імпульсних ксенонових ламп для бактерицидної обробки.**

Параметри	ртутна лампа низького тиску	ртутна лампа високого тиску	Амальгамна лампа	Імпульсна ксенонова лампа
Кількість металевої	3-10	100-300 і більше	0,00003	немає



ртуті в лампі, мг			в парах	
Продовження таб.1				
ККД бактерицидного випромінювання (з урахуванням кривої бактерологічної ефективності),%	30-40	8-11	30-40	8-10
Ресурс лампи, тис. годин	12-16	3-5	12-16	1 (при частоті 30 Гц)
Ресурс джерела живлення, тис. годин	50	50	50	1-5
Маса джерела живлення, кг	0,2	5-10	0,5	5-30
Вартість джерела живлення, Євро	5-10	200-400	50-100	5000-10000
Гарантоване знезараження повітря в приміщеннях або потоків води і повітря	Так	Так	Так	Частота повторення імпульсів повинна бути досить високою. При низькій частоті імпульсів деякі обсяги не отримують необхідну дозу УФ випромінювання
Можливість використання перегрітого механізму стерилізації	немає	немає	немає	дозволяє стерилізувати мікроорганізми, які стійкі до УФ випромінюванню, стерилізувати розчини і предмети всередині упаковок
Напрацювання озону та інших побічних речовин	немає	є	немає	є
Простота експлуатації	+	+	+	- потрібно висококваліфікований персонал

Безпека експлуатації	+	- Напрацьовується озон	+	- Висока напруга (5-15 кВ) Напрацьовується озон
----------------------	---	---------------------------	---	---

Продовження таб.1

Експлуатаційні витрати	низькі	низькі	низькі	високі
Наявність нормативної бази	є	є	є	немає

### 3. Ультрафіолетові бактерицидні опромінювачі

Для використання ультрафіолетового бактерицидного випромінювання на практиці з метою знезараження повітря застосовуються різного типу бактерицидні опромінювачі.

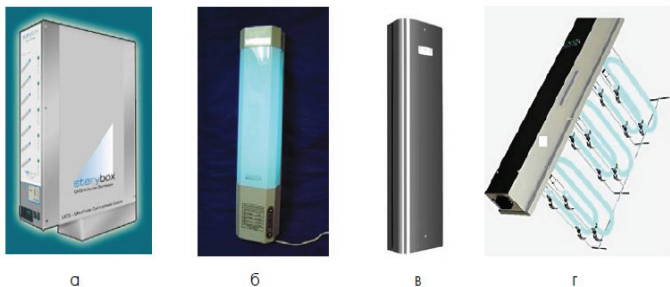
Ультрафіолетовий бактерицидний опромінювач це електротехнічний пристрій, який містить бактерицидну лампу, відбивач, пускорегулюючу апаратуру, конденсатори для підвищення коефіцієнта потужності мережі та придушення радіоперешкод, лічильник часу роботи бактерицидних ламп, а також допоміжні елементи кріплення лампи і пристосування для його установки. Основне призначення опромінювача – забезпечити зниження мікробного зараження повітряного середовища шляхом впливу на мікроорганізми ультрафіолетовим випромінюванням.

Опромінювачі діляться на дві групи: *відкриті* і *закриті*. У відкритих опромінювачів прямий бактерицидний потік від ламп і відбивача (або без нього) охоплює широку зону в просторі аж до тілесного кута 4 радіан. Вони призначені для знезараження приміщень тільки у відсутності людей. Закриті опромінювачі призначені для знезараження приміщень як в присутності, так і у відсутності людей.

Закритий опромінювач-рециркулятор знезаражує дією ультрафіолетового бактерицидного випромінювання не весь об'єм приміщення, а тільки його невелику частину, укладену в камеру, в якій встановлені бактерицидні лампи і вентилятор. Знезараження повітря здійснюється в процесі його прокачування через вентиляційні отвори камери. Цей процес триває безперервно і може забезпечити багаторазовий рециркуляційний обмін повітря і його знезараження в приміщенні в присутності людей.

Конструкція камери повністю виключає вихід випромінювання в простір.

На рис.3-5 наведені світлини деяких сучасних бактерицидних опромінювачів.



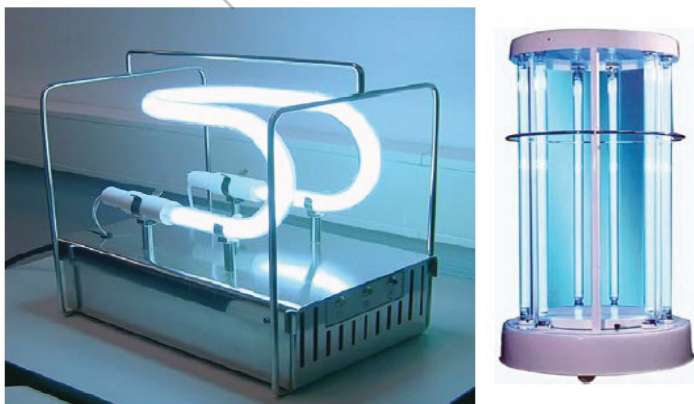
**Рис.3.** Приклади закритих УФ-опромінювачів (рециркуляторів):

а) Sterybox TissiMedica (США). Продуктивність 20-50 м<sup>3</sup>/год – п'ять ртутних ламп по 25 Вт;

б) Ферропласт (Росія). Продуктивність 90 м<sup>3</sup>/год – дві ртутні лампи по 30 Вт;

в) АЕРО-ЛІТ-200НВО «ЛІТ» (Росія); продуктивність 200 м<sup>3</sup>/год – одна амальгамна лампа 170 Вт;

г) бактерицидні осередки, НВО «ЛІТ» (Росія). призначені для вбудовування в систему вентиляції для знезараження потоків повітря продуктивністю до 3000 м<sup>3</sup>/год (три амальгамні лампи).



**Рис.4.** Приклади реалізації відкритих бактерицидних УФ-опромінювачів.



**Рис.5.** Приклад комбінованого пристрою (рециркулятора), що об'єднує УФ-рециркулятор з комбінованим фільтром.

#### 4. Ексімерні (ексіплексних) газорозрядні лампи та лампи на радикалах гідроксилу

Першими прототипами ексиламп були системи на основі наносекундного бар'єрного розряду та мікророзряду змінного струму через діелектричну плівку, які були реалізовані в Проблемній науково-дослідній лабораторії фізичної електроніки при кафедрі квантової електроніки Ужгородського університету, Вони були розроблені досліджені ще в 1978 році.

Ексилампи є підкласом розрядних ламп, випромінюючих за рахунок розпаду ексимерних молекул [ексімерів – від англ. excited dimer (excimer) – збуджений димер, якщо мова йде про молекулу, що складається з однакових атомів, наприклад  $Ar_2^*$ ] або ексиплексних молекул [ексіплексів – від англ. excited complex (exciplex) – збуджений комплекс, якщо мова йде про гетероядерні молекулі, наприклад  $XeF^*$ ]. Особливістю цих молекул є їх стійкість в електронно-збудженому стані і відсутність міцного зв'язку (нестійкість) в основному. Час життя такої молекули в збудженому стані обмежений і складає для різних ексиплексних молекул від  $10^{-9}$  до  $10^{-7}$  с. Спонтанний розпад молекули на окремі атоми супроводжується випромінюванням характерного для даного комплексу кванта світла.

Ексилампи випромінюють в УФ і ВУФ областях спектра. Як правило, до 80% від загального світлового потоку зосереджена у вузькій смузі, що має ширину не більше декількох нанометрів, що і відрізняє ексилампи від інших газорозрядних джерел випромінювання. Вибором робочої молекули і тиску робочої суміші можна забезпечити переважне опромінення в заданому діапазоні довжин хвиль. Нижче наведені довжини хвиль, на яких випромінювання ексимерних і ексіплексних молекул максимально:

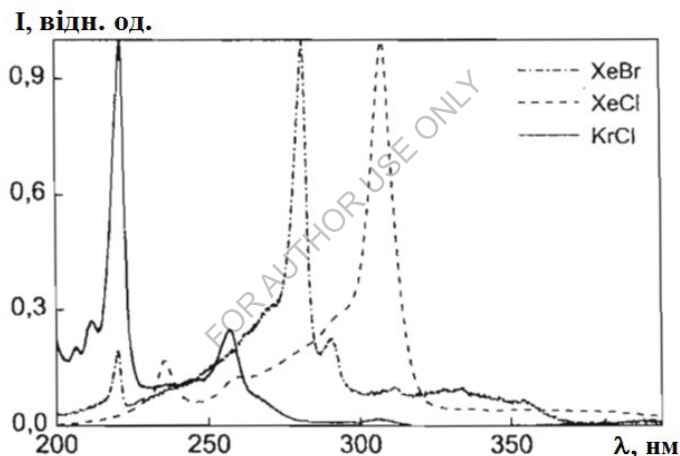
На рис.6. і 7 представлені характерні спектри ексиламп і лампи на радикалах ОН, які накачувались ємнісним розрядом на різних газових сумішах. Робочі параметри ексиламп ємнісного розряду, використані в експериментах, наведені нижче:

	XeCl- ексилампа	KrCl- ексилампа	XeBr- ексилампа
Довжина хвилі $\lambda$ ( $B \rightarrow X$ перехід), нм	308	222	283
Півширина смуги випромінювання $B \rightarrow X$ , нм	7	5	5
Густина потужності УФ випромінювання, мВт/см <sup>2</sup>	До 10	До 20	До 10

Ексимери		Ексіплекси	
Молекула	$\lambda$ , нм	Молекула	$\lambda$ , нм
Ar <sub>2</sub> *	129	ArF*	193
Kr <sub>2</sub> *	147	ArCl	175
Xe <sub>2</sub>	172	ArBr*	165
F <sub>2</sub> *	158	KrP*	248
Cl*	258	KrCl*	222
Br <sub>2</sub> *	290	KrBr*	207
I*	343	KrI	190
		XeF*	351
		XeCl*	308
		XeBr*	282
		XeI	253

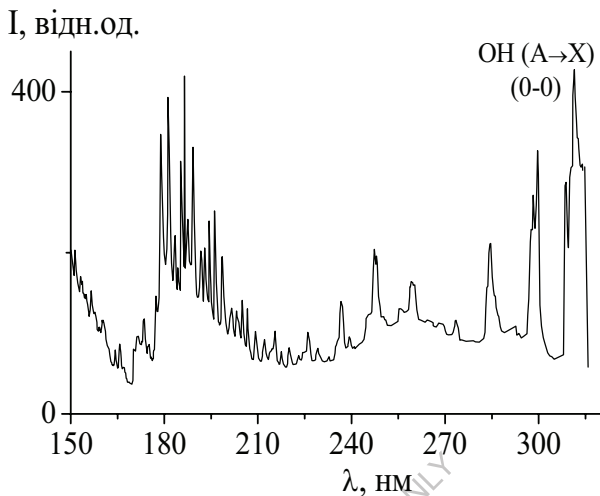
Превагами ексиламп є: велика енергія фотона (3,5-10 еВ), вузька смуга випромінювання, відносно висока питома потужність випромінювання, можливість масштабування і вибору довільної геометрії поверхні, що випромінює, відсутність ртуті в колбі, відносно слабкий розігрів колби ексиламп, швидкий вихід (за кілька секунд) на робочий режим.

Конструкція ексилампи з накачуванням наносекундним бар'єрним розрядом та спектри випромінювання такого випромінювача наведені на рис.7 і 8.



**Рис.6.** Спектри випромінювання ексиламп емнісного розряду на різних робочих молекулах.

Використання ексиламп розширює можливості селективного впливу на фотохімічні і фотофізичні системи, де традиційно використовувалися ртутні лампи або ексимерні лазери. Імпульсні ексимерні лазери, дозволяють транспортувати випромінювання з мінімальними втратами в потрібну область фотохімічного реактора і так само, як і ексилампи, селективно збуджувати деякі електронні стани досліджуваних сполук.



**Рис.7.** Спектр випромінювання імпульсно-періодичної УФ-ВУФ лампи на газовій суміші:  $p(\text{Ar})/p(\text{H}_2\text{O}) = 1.0 / 0,13$  кПа.

Однак лазери мають і недоліки, до яких відноситься їх складність, що веде до великих експлуатаційних витрат і вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Таким чином, за сукупністю своїх властивостей ексилампи є потенційно перспективною системою, яка могла б бути використана для вирішення різних завдань аналітичної хімії, фотобіології і фотомедицини.

### Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте будову, принцип роботи і вихідні характеристики ртутних ламп низького тиску.
2. Якими є характеристики і механізм випромінювання ртутних ламп високого тиску?
3. Якими характеристиками і параметрами УФ-газорозрядних ламп оперують в світлотехніці?

4. *Наведіть принцип дії і вихідні характеристики імпульсних ксенонових ламп. В чому полягають їх переваги та недоліки в порівнянні з ртутними лампами ?*
5. *Охарактеризуйте вихідні характеристики і області застосування ультрафіолетових бактерицидних випромінювачів.*
6. *В чому полягає принцип роботи і якими є вихідні характеристики експлексних газорозрядних ламп ?*
7. *Охарактеризуйте УФ-лампи на радикалах ОН з накачуванням наносекундним ємнісним розрядом.*

FOR AUTHOR USE ONLY



## **ТЕМА-4. ГАЗОРОЗРЯДНІ УЛЬТРАФІОЛЕТОВІ ЛАМПИ НА ХЛОРИДАХ АРГОНА І КРИПТОНА**

### **Вступ**

Практичний коефіцієнт корисної дії таких УФ-ВУФ ексиплексних лазерів знаходився в діапазоні 1-5 %, виготовлення і використання подібних лазерів було коштовним і потребувало для обслуговування кваліфікованого персоналу. Проте значна кількість застосувань ексимерних і ексиплексних лазерів не потребує транспортування лазерних променів на значну відстань або їх високої когерентності чи монохроматичності. Тому для таких застосувань більш перспективним є використання потужних і ефективних джерел спонтанного УФ-ВУФ випромінювання на основі ексиплексних молекул (ексиламп).

В порівнянні з ртутними лампами на  $\lambda = 254$  нм, ексиплексні лампи випромінюють в широкій спектральній області ( $\lambda = 126-354$  нм), характеризуються однією чи декількома робочими молекулярними смугами шириною 1-10 нм при порівняній ефективності між ними. Перспективними є також УФ-ВУФ випромінювачі на основі молекул галогенів, особливо – хлору ( $\lambda = 258$  нм  $\text{Cl}_2(D' \rightarrow A')$ ), довжина хвилі спектральної лінії атома ртуті типових ртутних ламп низького або високого тиску, під випромінювання яких було розроблено велику кількість різних оптичних технологій.

Для збільшення імпульсної потужності або енергії в імпульсі випромінювання окремої смуги ексиплексної молекули застосовують об'ємний розряд з УФ- передіонізацією або об'ємний розряд без додаткового джерела передіонізації (предіонізація відбувається від пучка електронів, що втікають та супутнього йому ренгенівського випромінювання).

Оскільки в лампах з накачуванням об'ємним розрядом завжди є контакт металевих електродів з агресивним галогеновмісним середовищем, то ресурс роботи цих ламп невеликий. Тому в останній час було зосереджено основні зусилля на розробку та оптимізацію ексиплексних ламп з накачуванням бар'єрним розрядом. Збудження цих ламп відбувалось переважно бар'єрним розрядом змінного струму підвищеної частоти або

імпульсами напруги (струму) тривалістю 1-2 мкс при частоті  $f = 1-100$  кГц.

Основну зацікавленість викликає розробка ламп ВУФ-діапазона спектру на молекулах  $\text{AgCl}(X\text{-B})$  та УФ-ламп на молекулах фторида ( $\lambda \sim 248$  нм) і хлорида ( $\lambda \sim 222$  нм) криптону, які можуть стати альтернативою лампам низького тиску на атомах ртуті ( $\lambda \sim 254$  нм  $\text{HgI}$ ) в бактерицидній ділянці спектру, оскільки їх випромінювання потрапляє в головний максимум поглинання молекул ДНК.

Для більш рівномірного перекриття бактерицидного діапазону спектру, збільшення потужності випромінювання і селективної дії на окремі біомолекули необхідно мати потужні УФ-ВУФ випромінювачі з можливістю перебудови їх спектрів випромінювання та досить високим ресурсом роботи в газостатичному режимі, робочим середовищем для яких можуть бути суміші  $\text{Kr}(\text{Ar})\text{-SF}_6(\text{CCl}_4, \text{I}_2)$ . Але вихідні характеристики подібних багатохвильових ексиплексних випромінювачів, які збуджувались за допомогою високовольтного бар'єрного розряду наносекундної тривалості, малодосліджені.

В лекції приведені результати систематичних досліджень характеристик багатохвильової УФ-ВУФ ламп на суміші аргону, криптона і парів фреона ( $\text{CCl}_4$ ) з накачуванням наносекундним бар'єрним розрядом.

## 1. Методика і техніка експеримента

Для проведення дослідження вихідних характеристик ексиплексних і галогенних джерел УФ-ВУФ спонтанного випромінювання із накачуванням бар'єрним розрядом малої тривалості використано метод емісійної спектроскопії з наносекундним часовим розділенням, який полягає у вимірюванні інтенсивності випромінювання відповідної довжини хвилі та часових характеристик напруги і струму розряду.

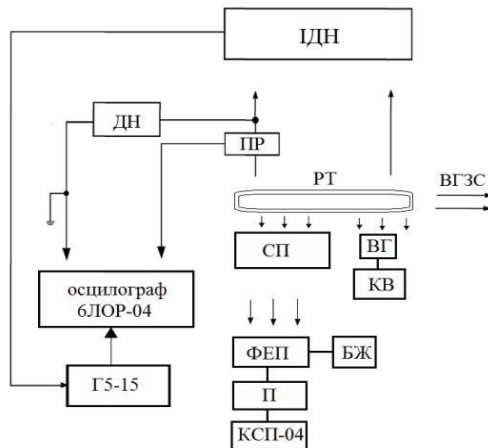
Вимірювання абсолютної потужності УФ-ВУФ випромінювання лампи бар'єрного розряду проводились за допомогою каліброваного приладу «Кварц 01». Вузька ділянка апертури випромінювача, з якої відбиралося випромінювання розряду, знаходилась на віддалі  $L=60$  см від голівки приймача

«Кварц 01». Якщо  $L > 10 \cdot d$  (де  $d$  – діаметр діафрагми), то спектральну вузьку ділянку можна розглядати як точкове джерело випромінювання. Для виділення з усієї поверхні розряду випромінювання визначеної спектральної ділянки використовувався світлофільтр УФС-5 з відомим коефіцієнтом пропускання  $k_{\phi} = 0.98$  в спектральній ділянці 280 – 350 нм. Випромінювання точкового джерела, яке реєструє голівка приймача діаметром  $D = 1.2$  см, складає  $4 \sin^2 \alpha$ , де  $\alpha = \arctg(D/2L)$ . Для обчислення абсолютної потужності випромінювання потрібно ввести коефіцієнт спектральної чутливості  $K_1$ , який враховує реєстрацію випромінювання приладом «Кварц 01» в спектральному діапазоні 240-350 нм та коефіцієнт  $K_2$ , який враховує поправку на чутливість в спектральному діапазоні 150-350 нм. Тоді формула для визначення абсолютної потужності випромінювання лампи приймає вигляд:

$$P = \frac{S}{\pi d^2} \cdot 4 \cdot \frac{2}{\sin \alpha} \cdot \frac{1}{k_{\phi}} \cdot K_1 K_2 W, \quad (1)$$

де  $S = \pi d L$  – площа усієї поверхні джерела випромінювання;  $\pi d^2$  – площа діафрагми;  $W$  – потужність зареєстрована приладом «Кварц 01».

Для реєстрації випромінювання лампи бар'єрного розряду в спектральному діапазоні  $\Delta\lambda = 140 - 315$  нм використовувалась експериментальна установка, схема якої наведена на рис.1. Дослідження спектрів випромінювання плазми проводилось за допомогою фотопомножувача ФЕП-142 з LiF-віконцем і однометрового вакуумного монохроматора, який був побудований за схемою Сейя-Наміока. Випромінювання в спектральному діапазоні  $\lambda = 200 - 400$  нм також реєструвалось за допомогою дифракційного монохроматора МДР-2 з дифракційною решіткою 1200 штр/мм і фотопомножувача ФЕУ-106. Випромінювання лампи з центральної частини розрядної колби поступало через LiF віконце у вакуумний монохроматор з оберненою лінійною дисперсією 0.7 нм/мм. Залишковий тиск атмосферних газів в монохроматорі не переважав  $10^{-4}$  Па. Спектри приводились до реального вигляду з врахуванням відносної чутливості системи «монохроматор - фотопомножувач».

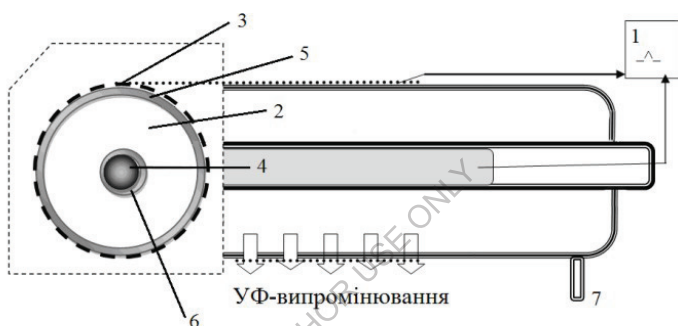


**Рис.1.** Загальна схема експериментальної установки: ІДН – імпульсне джерело напруги; ВМ – вакуумний монохроматор; ВГЗС – вакуумна газозмішувальна система; ФЕП – фотоелектронний помножувач; БЖ – блок живлення; П – підсилювач постійного струму, КСП-4 – самописець; ПР – пояс Роговського; ДН – дільник напруги; Г5-15 – генератор імпульсів; СП – спектральний прилад.

Для реєстрації імпульсів струму на розрядному проміжку використовувався пояс Роговського. Реєстрація імпульса напруги проводилась з використанням малоіндуктивного ємнісного дільника. Сигнали, які надходили від поясу Роговського і дільника напруги подавалися на вхід імпульсного осцилографу БЛОП-04, який мав часове розділення близько 1 нс.

Для одержання УФ-ВУФ випромінювання хлоридів аргону і криптону з плазми на сумішах Ag, Kr і парів  $CCl_4$  використана циліндрична двобар'ерна розрядна трубка, схема якої приведена на рис. 2. Розрядна колба виготовлена у вигляді двох циліндричних коаксіальних кварцових трубок (марки КУ-1) (5,6). Довжина колби складала 20 см, її зовнішній був діаметр рівним – 24 мм. Зовнішній діаметр внутрішньої розрядної трубки (6) складав 12 мм. Електродна система складалася з двох електродів, відстань між якими складала 4.5 мм. Зовнішній електрод, довжиною 160 мм, виготовлений з нікелевого дроту діаметром

0.3 мм, який був намотаним на зовнішню кварцову трубку з кроком 2 мм. У внутрішній кварцовій трубці розташований суцільний алюмінієвий електрод довжиною 250 нм. Прозорість конструкції лампи складала 70 - 80%. Слід відмітити, що газорозрядна трубка дозволяла досліджувати випромінювання з  $\lambda > 200$  нм. Для реєстрації емісійних характеристик ВУФ - випромінювання ( $\lambda < 200$  нм) вона під'єднувалась до вхідної частини вакуумного монохроматора через LiF-віконце.



**Рис.2.** Конструкція коаксіального циліндричного випромінювача з двома діелектричними бар'єрами: 1 – генератор імпульсів високої напруги; 2 – розрядний проміжок; 3– зовнішній електрод у вигляді спіралі з нікелевого дроту; 4 – внутрішній електрод у вигляді суцільного циліндра з алюмінію; 5 і 6 – дві трубки з кварцу марки КУ-1; 7 – патрубок для запуску робочої суміші.

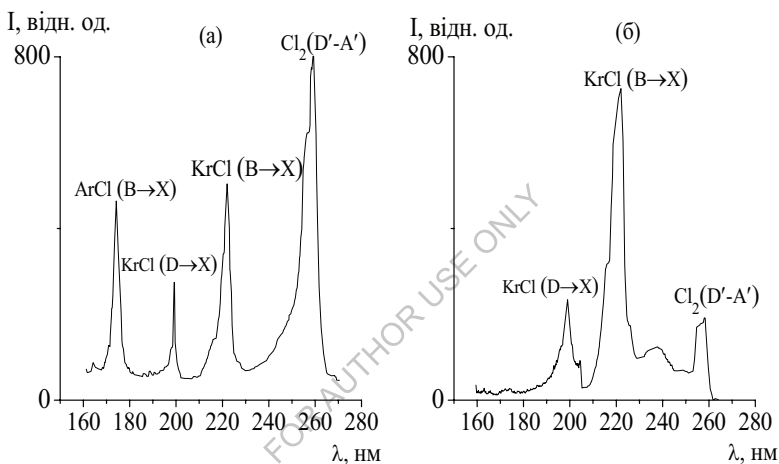
## 2. Оптичні та електричні характеристики лампи

В експериментах були досліджені спектральні характеристики лампи з двома діелектричними бар'єрами, яка заповнювалась сумішшю  $Kr/Ag/CCl_4$ . Дослідження спектрів випромінювання плазми проводились при частотах слідування в діапазоні 40-100 Гц.

В сумішах важких інертних газів з молекулами  $CCl_4$  реалізовано спосіб досягнення багатохвильового режиму випромінювання УФ-ВУФ ексилампи, при якому використовувався один галогеноносій і два різні інертні робочі

гази (Ar,Kr). При цьому також використовується і додаткова смуга випромінювання молекули хлора – 258 нм. Це дозволило використати лампу з двома діелектричними бар'єрами, в якій інтенсивність випромінювання смуги 222 нм KrCl(X-B) регулювалась величиною парціального тиску кріптона в суміші Kr/Ar/CCl<sub>4</sub>.

Характерні спектри випромінювання УФ-ВУФ лампи наведені на рис.3.

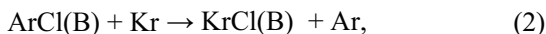


**Рис.3.** Спектри випромінювання УФ-ВУФ джерела на основі сумішей р(Kr)/р(Ar)/р(CCl<sub>4</sub>): 1.33/6.6/0.13 кПа (а) і 6.6/6.6/0.13 кПа (б) при f = 80 Гц.

При малому парціальному тиску кріптона – $p(\text{Kr}) = 0.3\text{--}1.3$  кПа в спектрах спостерігалися смуги з  $\lambda = 175$  нм ArCl (X-B), 199 нм KrCl (X-D), 222 нм KrCl (X-B) і 258 нм Cl<sub>2</sub> (A'-D'). Найбільш чутливим розподіл інтенсивності в спектрі випромінювання цієї лампи був до парціального тиску кріптона, оскільки у атома кріптона найменша енергія нижніх метастабільних рівнів.

Особливістю застосування як хлорносія молекули CCl<sub>4</sub> в порівнянні з простішими молекулами (HCl, Cl<sub>2</sub>) є вища інтенсивність випромінювання смуги 258 нм Cl<sub>2</sub> (D' - A') в

порівнянні із смугами хлоридів аргона і криптона [13]. Введення криптона в подвійну суміш ( $p(\text{Kr}) = 1.3 \text{ кПа}$ ) не призводило до значного зменшення чи збільшення сумарної інтенсивності УФ-ВУФ випромінювання молекулярних смуг, а тільки до перерозподілу їх інтенсивностей між собою. Основним процесом, що забезпечує перерозподіл інтенсивності випромінювання смуг ексиплексних молекул є реакція заміщення атомів аргону атомами криптона при утворенні відповідних монохлоридів:



механізм якої пов'язаний з передачею енергії від метастабільних атомів аргона атомам криптона. Такі реакції характеризуються досить великими константами швидкості,  $(5-7) \times 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ .

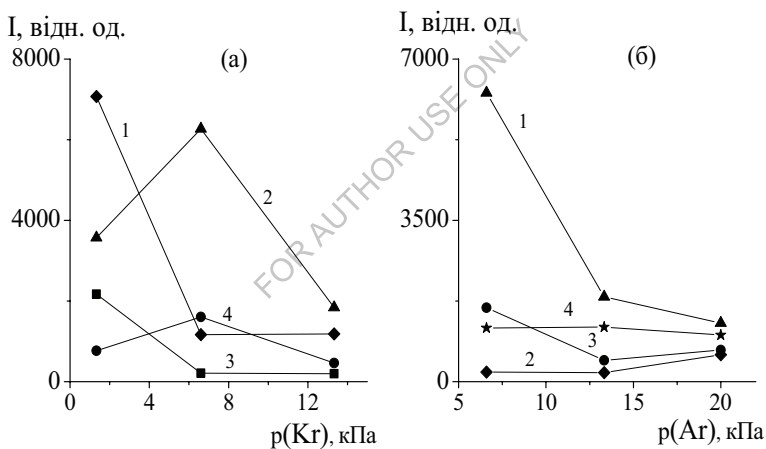
Типові осцилограми напруги, струму та електричної потужності наносекундного бар'єрного розряду наведені на прикладі розряду в газовій суміші  $\text{Ar} - \text{CCl}_4$ . Амплітуда основного максимуму імпульсу струму досягала 33 А (суміш  $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 6.6 - 0,13 \text{ кПа}$ ) при його тривалості 20-30 нс. В розряді же підвищеного тиску на суміші  $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 24 - 0,13 \text{ кПа}$  амплітуда струму зростала до 50 - 60 А при тривалості імпульсу струму близько 30-35 нс. Амплітуда імпульсів напруги на розрядному проміжку досягала 16 кВ (для розряду в суміші  $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 6.6 - 0,13 \text{ кПа}$ ) та 22 кВ (для розряду в суміші  $p(\text{Ar}) - p(\text{CCl}_4) = 24 - 0,13 \text{ кПа}$ ). Осцилограми електричної потужності наносекундного бар'єрного розряду показали, що в діапазоні часів близько  $t=50 \text{ нс}$  в розряд вноситься максимальна енергія. При збільшенні парціального тиску інертного газу (аргону) до 24 кПа спостерігалось збільшення енергетичного внеску в плазму, що може бути зумовлено кращим узгодженням вихідного опору генератора імпульсів високої напруги з опором розряду.

Розглянемо результати оптимізації робочих сумішей багатохвильової лампи на хлоридах важких інертних газів та молекулах хлору.

Результати оптимізації смуг випромінювання ексиплексних молекул і молекули хлору в багатохвильовій лампі на потрібній суміші  $\text{Ar-Kr-CCl}_4$  від величини парціального тиску важких інертних газів при фіксованому парціальному тиску  $p(\text{CCl}_4)$  (рис.4)

показали, що збільшення парціального тиску аргону (при  $p(\text{Kr}) = \text{const}$ ) в діапазоні 6.5 - 13.5 кПа приводило до значного зменшення інтенсивності випромінювання смуг  $\text{KrCl}(\text{B} \rightarrow \text{X}; \text{D} \rightarrow \text{X})$ ,

Збільшення парціального тиску криптону від 1.2 до 6.6 кПа (при  $p(\text{Ar}) = \text{const}$ ) приводило до значного зменшення інтенсивності смуги 175 нм із-за реакції заміщення атомів аргону атомами криптону при утворенні хлоридів аргона і криптону. Інтенсивність випромінювання смуги хлора, при цьому, також зменшувалася приблизно на порядок. Для отримання максимальної інтенсивності смуг  $\text{KrCl}(\text{B} \rightarrow \text{X}; \text{D} \rightarrow \text{X})$  оптимальний парціальний тиск криптону в потрійній суміші знаходився в діапазоні 6 – 8 кПа.



**Рис.4.** Залежність інтенсивності випромінювання смуг хлоридів інертних газів і молекули хлору від величини парціального тиску криптону в лампі на суміші  $\text{Kr}/\text{Ar}/\text{CCl}_4$  при  $p(\text{CCl}_4) = 130$  Па,  $p(\text{Ar}) = 6.6$  кПа і  $f = 80$  Гц: 1 – 258; 2 – 222; 3-175; 4-200 нм (а) та від величини парціального тиску аргона в лампі на суміші  $\text{Kr}/\text{Ar}/\text{CCl}_4$  при  $p(\text{CCl}_4) = 130$  Па,  $p(\text{Kr}) = 6.6$  кПа і  $f = 80$  Гц: 1 – 222; 2 - 175; 3-200; 4-258 нм (б).



### 3. Потужність випромінювання і ресурс роботи лампи

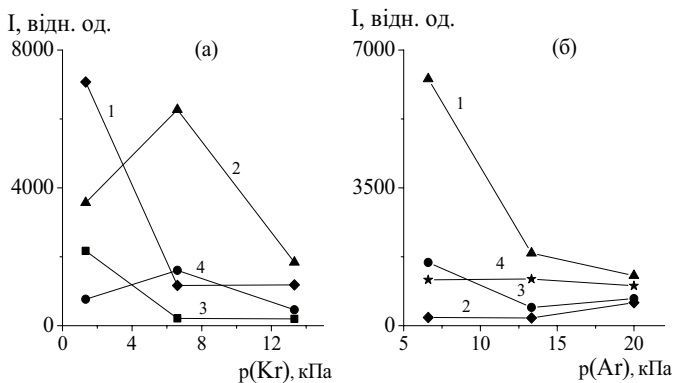
Енергетичні і ресурсні характеристики багатохвильових УФ-ВУФ ексиламп з накачуванням наносекундним бар'єрним розрядом розгнємо на прикладі ламп на хлоридах інертних газів і молекули хлора.

Залежність середньої потужності випромінювання УФ-ВУФ лампи бар'єрного розряду на потрійній суміші  $Kr/Ar/CCl_4$  наведена на рис.5. Оптимум середньої потужності випромінювання знаходився при парціальному тиску криптона 6.6 кПа, а подальше збільшення парціального тиску приводило до спаду потужності випромінювання (рис.5.а). При парціальному тиску аргона 1.3 кПа спостерігалась найбільша середня потужність випромінювання лампи (рис.5.б). Оптимізація залежностей середньої потужності випромінювання від тиску аргона показала, що потужність випромінювання лампи на основі потрійної суміші у два рази більша від лампи на суміші  $Ar/CCl_4$ .

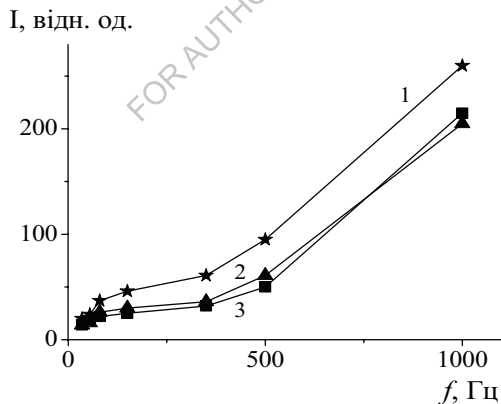
Залежності інтенсивності смуг 222 нм  $KrCl$  (X-B), 258 нм  $Cl_2$  (A'-D') і 175 нм  $ArCl$  (X-B) від частоти слідування імпульсів струму приведені на рис.2.22. Відносна інтенсивність кожної смуги приведена в різних відносних одиницях і вони не можуть порівнюватися між собою. У діапазоні частот 40-400 Гц залежності на рис.6. нелінійні, а при збільшенні частоти до 1000 Гц вони стають лінійними без ознак насичення інтенсивності випромінювання.

Такий характер залежностей можливо пов'язаний з внеском продуктів дисоціації молекул  $CCl_4$  в утворення ексиплексних молекул і молекул  $Cl_2$  (D').

Ефективніше утворюються молекули  $ArCl$  (B;C) у вторинних реакціях: це «гарпунна» реакція атомів  $Ar(^3P_2)$  з молекулами хлору і іон-іонна рекомбінація іонів  $Ar^+$  з іонами  $Cl^-$ . Напрацювання складових цих реакцій найефективніше відбувається при підвищених частотах проходження імпульсів струму, що може бути причиною зміни форми залежностей, приведених на рис.6., при переході від низьких до високих частот. Оцінка константи гасіння молекул  $ArCl$  (X-B) і  $Cl_2$  (A' - D') з наших



**Рис.5.** Залежність середньої потужності УФ-ВУФ лампи на суміші Кг/Аг/ССl<sub>4</sub> від парціального тиску криптона (при  $p(\text{Ar}) = 1.3$  кПа,  $p(\text{CCl}_4) = 130$  Па) (а) та аргона (при  $p(\text{Kr}) = 6.6$  кПа,  $p(\text{CCl}_4) = 130$  Па) (б) при частоті слідування імпульсів струму  $f = 80$  Гц та зарядній напрузі робочого конденсатора 13 кВ.

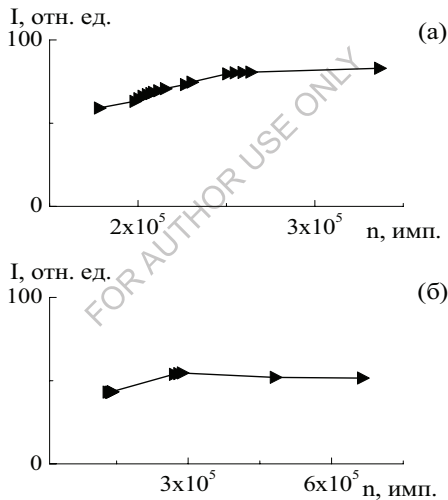


**Рис.6.** Залежності інтенсивності випромінювання смуг КгСl (Х-В) (1), Сl<sub>2</sub> (А'-D') (2) і АгСl (Х-В) (3) від частоти проходження імпульсів струму бар'єрного розряду в суміші  $p(\text{Kr})/p(\text{Ar})/p(\text{CCl}_4) = 1.33/6.6/0.13$  кПа.

результатів дослідження з використанням формули Штерна-Фольмера показало, що для молекули АгСl ( $\tau_p \approx 5.2$  нс) константа

швидкості гасіння складає  $k_T \approx 1 \times 10^{-10} \text{см}^3 \text{с}^{-1}$ , а для молекули  $\text{Cl}_2(\text{D}')$  ( $\tau_p \approx 16 \text{нс}$ ) вона є в два рази меншою -  $k_T \approx 0.5 \times 10^{-10} \text{см}^3 \text{с}^{-1}$ .

На рис.7. приведені залежності інтенсивності випромінювання характеристичних смуг випромінювання (нормованих на свою максимальну величину) молекул  $\text{ArCl}(\text{B})$  і  $\text{Cl}_2(\text{D}')$  від кількості розрядних імпульсів бар'єрного розряду в суміші  $p(\text{Ar})/p(\text{CCl}_4) = 13.30 \text{кПа}/0.13 \text{кПа}$ . Ефективність утворення молекул  $\text{ArCl}^*(\text{B})$  (рис.7.а) збільшувалась при збільшенні кількості розрядних імпульсів з  $2 \times 10^5$  до  $2.5 \times 10^5$ . Після  $2.5 \times 10^5$  імпульсів густина молекул  $\text{ArCl}(\text{B})$  виходила на стаціонарний рівень. Для молекул хлора отримано приблизно такі ж результати (рис.7.б), що вказує на



**Рис.7.** Залежності нормованих інтенсивностей випромінювання смуги  $\text{ArCl}(\text{X-B})$  (а) та смуги  $\text{Cl}_2(\text{A'-D}')$  (б) від кількості розрядних імпульсів наносекундного бар'єрного розряду в суміші  $p(\text{Ar})/p(\text{CCl}_4) = 13.30 \text{кПа}/0.13 \text{кПа}$ .

напрацювання з часом атомів хлору або радикалів, які беруть участь в утворенні молекул  $\text{ArCl}(\text{B})$  і  $\text{Cl}_2(\text{D}')$ . Більш виражено ці

ефекти проявлялися в ексиплексних лазерах і лампах з накачуванням поперечному розрядом.

При охолодженні колби **УФ-ВУФ** випромінювача потоком повітря від вентилятора він міг працювати тривалий час при частотах слідування імпульсів струму в діапазоні  $\Delta f = 40 - 150$  Гц. При більш високих частотах можливим було лише короткочасне вмикання **УФ-ВУФ** випромінювача на 5 - 10 хвилин. Ресурс роботи джерела **УФ-ВУФ** випромінювання в газостатичних умовах різко зменшувався внаслідок недостатньої ефективності системи повітряного охолодження колби лампи.

Таким чином, дослідження емісійних характеристик **УФ-ВУФ** випромінювачів на хлоридах аргона, криптона та молекули хлора, які збуджувались за допомогою наносекундного бар'єрного розряду в суміші  $\text{Kr-Ar-CCl}_4$  виявило умови ефективної роботи багатохвильової **УФ-ВУФ**-лампи в спектральному діапазоні 170-260 нм. При використанні потійної робочої суміші лампа випромінювала на системі смуг 175 нм и 222 нм хлоридів криптона і аргона, а також смуги 258 нм молекули хлора; для  $\text{V} \rightarrow \text{X}$  смуг випромінювання молекул  $\text{KrCl}$  та  $\text{ArCl}$  оптимальний парціальний тиск парів фреона знаходився в межах 130 - 180 Па, а для смуги 258 нм –  $p(\text{CCl}_4) = 300$  Па; оптимальний парціальний тиск криптона знаходився в діапазоні 6 - 8 кПа, а аргона складав - 1.3 кПа; середня потужність випромінювання (при  $f = 80$  Гц) досягала 1.7 Вт. Ресурс роботи **УФ-ВУФ** випромінювачів при газостатичних умовах в діапазоні частот слідування імпульсів 40 - 150 Гц досягав  $10^6$  імп., а варіація тиску та парціального складу робочих середовищ ламп дозволяла керувати спектром їх випромінювання в **УФ-ВУФ** області довжин хвиль.

### **Контрольні запитання**

- 1). *Охарактеризуйте переваги ексиламп відносно ексиплексних лазерів і ртутних ламп низького тиску.*
- 2). *Які методи вимірювання характеристик ексиламп Ви знаєте ?*
- 3). *Охарактеризуйте будову **УФ-ВУФ** ексилампи на систему смуг хлоридів аргона і криптона.*
- 4). *Які електричні характеристики у **УФ-ВУФ** лампи ?*
- 5). *Які умови роботи **УФ-ВУФ** ексилампи близькі до оптимальних ?*

## **ТЕМА-5. ОСНОВИ СВІТЛОКУЛЬТУРИ РОСЛИН ЗАКРИТОГО ГРУНТУ**

Однією з особливостей інтенсивного розвитку науки в ХХ столітті стала поява багатьох комплексних наукових дисциплін. Саме такою науковою дисципліною є і світлокультура рослин, яка синтезує в собі досягнення різних розділів фізики (електрика, оптика, фотометрія і ін.), технічних наук (світлотехніка, автоматика і ін.) біологічних наук (фізіологія рослин, рослинництво, селекція рослин і ін.), а також і інших галузей знань.

**Предметом** дослідження світлокультури, як наукової дисципліни, є рослинні організми або їх спільноти - фітоценози, вирощені при штучному освітленні, а **метою** світлокультури є розробка методів вирощування рослин за допомогою штучного опромінення для отримання наукових знань про рослини і сільськогосподарської продукції.

Для реалізації своєї мети світлокультура спирається на теоретичні основи різних природничо-наукових дисциплін фізичного і біологічного профілів і на досвід практичного вирощування рослин.

Вирощування рослин із застосуванням світлокультури можливо як при досвіті рослин штучним світлом, яка використовується в якості додатку до недостатнього фону природного світла, так і повністю на основі штучного світла.

У сучасній світлокультурі рослин більшість параметрів навколишнього середовища (мінеральне живлення, газовий склад атмосфери, температура, водний режим і т. д.) виводяться на рівні, які не лімітують життєві процеси у рослин. Як правило, основним фактором управління життєдіяльністю рослин в умовах світлокультури є світловий чинник. Промениста енергія, що отримується за допомогою штучних джерел світла, - одна з найбільш витратних статей на вирощування рослин в умовах світлокультури. Тому ефективне використання світлової енергії має для економіки світлокультури принципово важливе значення. У той же час інтенсивність і спектральний склад світла, його періодичність є потужним фактором керування різними сторонами

життєдіяльності рослин. В першу чергу тут важливо відзначити проблеми підвищення продуктивності вирощування рослин.

Світлові, як основного чиннику управління життєдіяльністю рослин, в світлокультурі приділяється першорядне значення.

Останній навчальний посібник по світлокультурі рослин для вузів (Леман, 1976) вийшло понад 20 років тому і, природно, вже не відображає в достатній мірі сучасний стан питання. Крім того, навчальна і монографічна література яка вийшла по світлокультурі є, як правило, хоча і вельми детальна, але в ній висвітлення тих чи інших питань світлокультури рослин, є досить однобічним. Традиційно глибоко і детально в цій літературі висвітлюються переважно фізіологічні основи світлокультури рослин.

Питання технічного забезпечення світлокультури рослин, що мають важливе значення для ефективного використання променевої енергії при культивуванні рослин, в літературі представлені недостатньо. Тому у студентів, які вивчають цю дисципліну, біологів, які працюють зі штучним кліматом, і у багатьох фахівців тепличних господарств, де використовується світлокультура, немає комплексного системного уявлення про взаємозв'язки біологічних особливостей різних видів рослин і біотехнологічних процесів з параметрами оптимальних світлових режимів і світлотехнічної апаратурою, здатної їх забезпечити. Як наслідок цього, можна зустріти фізіологічно необґрунтовані норми на встановлену електричну потужність для розміщення в теплицях ламп з різними світлотехнічними характеристиками, що призводить до недобору врожаю в умовах світлокультури. Інженерні служби нерідко слабо орієнтуються у виборі оптимальних для тих чи інших умов світлокультури джерел світла,

## **1. Історія розвитку світлокультури рослин закритого ґрунту**

Перші відмічені в літературі спроби вирощування рослин з використанням штучного світла відносяться до другої половини XIX сторіччя. Як джерела світла спочатку використовували гасові лампи, газові пальники, вугільні дуги і малопотужні лампи розжарювання. Світлові потоки, що одержувались від таких джерел, були низькими і не забезпечували повноцінний ріст і розвиток рослин; тому мова могла йти про використання штучного світла лише як невеликого додатку до природного

світла. Це були не систематичні досліді, які не виходили за рамки лабораторних експериментів вчених і окремих ентузіастів-дослідників. Проте, на цьому початковому етапі зародження світлокультури був зроблений важливий висновок: штучне світло не є шкідливим для рослин, більш того, при його додаванні до слабкого природного світла рослини виглядають краще, їх забарвлення стає більш зеленим, а листя крупнішим. Зрозуміло, ці ефекти штучного світла виявлялися лише тоді, коли природне освітлення було слабе, наприклад, в зимовий період. Цей етап розвитку світлокультури займає проміжок - часу 1865-1922 рр.; його межі визначаються першою згадкою в літературі про використання штучного світла для освітлення рослин (1865) і проведенням успішних дослідів з вирощування рослин повністю на штучному світлі в 1922 році.

Другий етап має приблизні межі 1922-1940 рр.; його відмінною рисою є доказ можливості вирощування рослин повністю на штучному світлі «від насіння до насіння». Вперше експериментально показати це вдалося в 1922 р американському досліднику Гарві. Це стало можливим завдяки появі потужних ламп розжарювання, які здатні давати світлові потоки, достатні для вирощування рослин повністю на штучному світлі. Таким чином, з'явилася наукова основа для практичного використання світлокультури рослин. У той же час виник ряд питань, які необхідно було вирішити до широкого застосування світлокультури в народному господарстві.

Штучне світло все ширше стали застосовувати для вирощування рослин. Правда, через досить низьких в той період часу експлуатаційних якостей потужних ламп розжарювання штучне світло в основному використовували як додаток до природного світла в теплицях. Вирощування рослин на повному штучному світлі проводили, як правило, в наукових цілях.

Тим не менше, використання штучного світла в якості підсвітки дозволило істотно скоротити терміни вигонки розсади і поліпшити її якість, в більш ранні терміни розпочати отримання овочевої продукції в теплицях, організувати вигонку деяких квіткових культур взимку. Штучне світло селекціонери стали використовувати для прискорення селекції рослин

Таким чином, на другому етапі розвитку світлокультури були закладені основи її практичного використання.

Третій етап почався з 1940 року і триває по даний час. Початок його пов'язують з появою нового типу джерел світла - газорозрядних ламп. На відміну від ламп розжарювання, газорозрядні лампи, при такому ж споживанні електроенергії, мали більший діапазон потужностей, давали в 2-3 рази більшу кількість світла і мали можливість варіювання його спектрального складу.

Стало можливим ввести в світлокультуру, при необхідності, практично будь-які види рослин, незалежно від ступеня їх світлолюбивості. Широко стали використовуватися режими «повної світлокультури», коли рослини вирощуються повністю на штучному світлі. Це дозволило «просунути» світлокультуру в північні регіони, де в період тривалих полярних ночей стало можливим вирощувати в теплицях овочеву продукцію і квіти повністю на штучному світлі. Таким чином, головною особливістю третього етапу є вихід світлокультури на промислову основу. У зв'язку з цим з'явився термін «промислова світлокультура рослин».

Ще одним важливим напрямком у розвитку світлокультури з'явилася селекція рослин, а також їх прискорене розмноження в зимовий період. За рахунок цілорічного вирощування рослин в умовах світлокультури, з'явилася можливість отримувати кілька поколінь рослин в рік, що було неможливо в польових умовах. Це дозволило інтенсифікувати процес селекції рослин на певні ознаки в кілька разів і тим самим скоротити виведення сортів рослин з 10-15 років при використанні традиційних польових умов до 5-7 років, якщо застосовуються умови світлокультури.

Розвиток світлокультури йшов швидкими темпами в СРСР в 50-80 роках 20-го сторіччя, коли вартість електроенергії для побуту була невисока. При різкому підвищенні вартості електроенергії з початку 90-х рр. масовий розвиток промислової світлокультури, що базувався на вирощуванні овочевих рослин, стала для багатьох підприємств і тепличних комплексів економічно не вигідною. Виправданим залишилось вирощування рослинної продукції в умовах повної світлокультури на даний час



є лише в північних регіонах за умови висококваліфікованого використання сучасних технологій.

У середніх широтах економічно виправдано в даний час використання в теплицях штучного світла як додатку до природного при вирощуванні рослинної продукції.

Зі сказаного, однак, не випливає, що світлокультура втратила свою актуальність. На початку 90-х років нашого століття акценти в розвитку світлокультури стали змінюватися. Одне з нових застосувань світлокультури пов'язано із загальним погіршенням екологічної ситуації на планеті. У зв'язку з цим світлокультуру стали розглядати як один з можливих методів отримання гарантовано екологічно чистих продуктів харчування. Таке харчування призначене для регіонів з неблагополучною екологічною обстановкою. Розроблена інтенсивна безвідходна технологія вирощування зернових, овочевих, вічно зелених, ягідних, квіткових, лікарських та технічних культур, що дозволяє використовувати її в промисловому і селекційному процесі. Обсяги виробництва даної продукції досить обмежені.

З початку 70-х років успішно розробляються проблеми космічного рослинництва, коли рослини необхідно вирощувати в умовах повної світлокультури. Розробки основ космічного рослинництва стосовно, зокрема, до майбутніх стаціонарним космічним станціям на Місяці і, можливо, на Марсі проводяться в штучних системах життєзабезпечення, де рослини є постачальниками рослинної їжі, води і регенераторами атмосфери, забезпечуючи «космонавтів» киснем і поглинаючи вуглекислоту, а також ряд шкідливих газоподібних домішок.

Таким чином, в даний час точки прикладання світлокультури, як методу вирощування рослин, є дуже різноманітними. Як надалі будуть розставлені акценти в розвитку цих напрямків, покаже час. Ясно одне - актуальність світлокультури в майбутньому, в тому чи іншому прояві, збережеться.

## **2. Діапазони природного оптичного випромінювання і його дія на рослини**

Основним джерелом природного оптичного випромінювання, прийнятеного для життєдіяльності рослин, є Сонце. Оптичне випромінювання Сонця знаходиться в дуже широкому інтервалі

довжин хвиль. Будемо використовувати для вимірювання довжини хвилі ( $\lambda$ ) нанометра (нм), що становлять  $10^{-9}$  м. Тоді хвильовий діапазон сонячної енергії, що досягає поверхні Землі, можна уявити схематично (рис.1).

Вплив випромінювання різних ділянок спектру на рослинний організм визначається енергією, яку має елементарний носій цієї енергії - квант. Енергія кванта випромінювання  $E$  залежить від його довжини хвилі  $\lambda$  і визначається за формулою:

$$E = ch / \lambda , \quad (1)$$

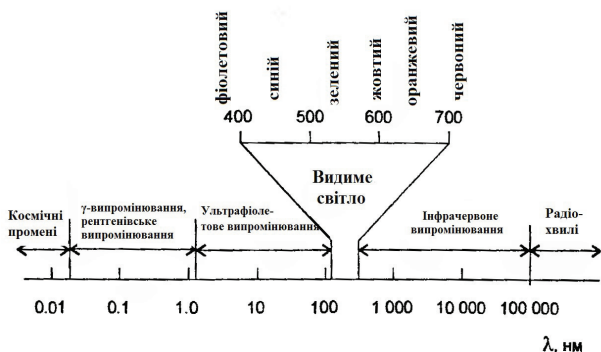
де  $c$  - швидкість світла у вакуумі,  $h$  - постійна Планка.

Часто енергію кванта записують, використовуючи замість довжини хвилі частоту випромінювання  $\nu$ , які пов'язані один з одним співвідношенням:

$$\lambda = c / \nu . \quad (2)$$

З рис.1 і формули (1) випливає, що енергія кванта випромінювання максимальна у космічних променів і мінімальна у радіохвиль. Що стосується рослин, то енергія квантів космічних променів,  $\gamma$ -випромінювання, рентгенівського випромінювання і короткохвильової частини ультрафіолетового (УФ) випромінювання настільки велика, що розриває хімічні зв'язки в молекулярних рослинних структурах і тому діє на рослини руйнівним чином. У сонячної радіації, що досягає поверхні Землі, ці види випромінювання майже повністю відсутні, оскільки вони поглинаються в верхніх шарах атмосфери.

Довгохвильове («м'яке») УФ-випромінювання і видиме випромінювання добре поглинаються рослинами. Енергія квантів цих ділянок спектру недостатня для руйнування хімічних зв'язків, проте здатна забезпечити ряд внутрішніх перебудов у атомів і молекул рослин, що викликає хімічні реакції, що лежать в основі життєвоважливих процесів - фотосинтезу, дихання, росту, фотоперіодизму і ін.



**Рис.1.** Спектральний діапазон оптичного випромінювання (логарифмічний масштаб).

Енергія квантів здебільшого інфрачервоного ( $\lambda > 4000$  nm) настільки слабка, що не здатна ініціювати хід зазначених вище хімічних реакцій. Правда, деякі області інфрачервоної радіації добре поглинаються водою, яка міститься в рослинах, і, таким чином, можуть підвищувати температуру рослин, що викликає, в свою чергу, ряд фізіологічних реакцій як позитивного, так і негативного характеру. Тому прийнято вважати, що інфрачервона радіація може давати на рослину не прямий, а опосередкований вплив.

Сонячну радіацію, що доходить до поверхні Землі, прийнято розділяти на два великих діапазону: 300-4000 nm і понад 4000 nm. Перший діапазон містить близько 99% енергії сонячної радіації, яка падає на поверхню Землі. Випромінювання, що знаходиться в цьому діапазоні, отримало назву «короткохвильова радіація». Другий діапазон випромінювання, з довжинами хвиль  $\lambda > 4000$  nm, називається діапазоном «теплової довгохвильової радіації». З точки зору дії випромінювання різного спектрального складу на рослини такий розподіл оптичного випромінювання не можна назвати вдалим, оскільки воно не відображає особливості його фізіологічного впливу. Ці особливості пов'язані, в першу чергу, з урахуванням двох типів впливу променистих потоків на рослинний організм: субстратного і регуляторного.

Субстратна роль світла заснована на використанні енергії світла в процесі фотосинтезу на утворення хімічних зв'язків, тобто

на синтез біомаси рослин. Регуляторна роль світла пов'язана з запуском тих чи інших механізмів, які «відкривають» або «закривають» можливості протікання різних фізіологічних процесів, наприклад, спрямованість біохімічних синтезів (вуглеводна або білкова), відкриття або закриття продихів, рух органів рослин під дією світла (фототропізм), початок зацвітання рослин і ін.

Енергетичні витрати на забезпечення регуляторних процесів набагато нижчі, ніж на субстратні потреби, щоб забезпечити рослин енергією для побудови органічної біомаси. Відмінності в цих витратах можуть досягати 100-1000 разів і більше.

За сучасними уявленнями, діапазон оптичного випромінювання, що має у рослин основне субстратно-регуляторне значення, має приблизні межі 280-750 нм. Усередині цих кордонів виділені спектральні діапазони, що мають наступне фізіологічне значення:

- 280-320 нм – надає, як правило, поганий впливає на ріст і розвиток рослин. Однак для деяких рослин (наприклад, Solanaceae) потрібна невелика кількість ( $= 3 \text{ Вт/м}^2$ ) випромінювання цього спектрального діапазону для нормального розвитку;

- 320-400 нм – грає регуляторну роль в розвитку рослин, тому доцільною є присутність цього випромінювання в невеликих кількостях (кілька відсотків) в загальному променистому потоці;

- 400-500 нм («синій») – володіє як субстратним, так і регуляторним впливом, повинен входити до складу спектру випромінювання фотосинтетичної активної радіації для вирощування рослин;

- 500-600 нм («зелений») – не є абсолютно необхідним для забезпечення фотосинтезу рослин, але, завдяки своїй високій проникаючій здатності, корисний для забезпечення фотосинтезу оптично щільних листя і густих посівів рослин;

- 600-700 нм («червоний») – має яскраво виражений субстратний і регуляторний вплив. Повинен входити до складу загального випромінювання для забезпечення високого фотосинтезу. Але монохроматичне червоне світло може призводити до аномального росту і розвитку деяких частин рослин, а в ряді випадків і до загибелі деяких видів рослин;

- 700-750 нм («дальній червоний») – має яскраво виражену регуляторну дію. У невеликих кількостях (кілька відсотків) повинен входити до складу загального випромінювання.

Спектральний діапазон 400-700 нм, що є основним для забезпечення процесу фотосинтезу, отримав назву фотосинтетична активна радіація (ФАР).

Очевидно, що всі зазначені спектральні діапазони входять до складу сонячного випромінювання, яке доходить до земної поверхні, в допустимих для життєдіяльності рослин поєднаннях. У той же час в умовах штучного опромінення рослин, коли природне світло відсутнє, забезпечення оптимальної присутності вищевказаних спектральних діапазонів в випромінюванні джерел світла є, як правило, досить проблематичним. У зв'язку з цим надзвичайно важливого значення набуває знання спектральних і енергетичних характеристик променистого потоку ламп при їх виборі як джерела випромінювання для світлокультури рослин. Крім цього, необхідно знання видових особливостей рослин, їх оптичних властивостей, а також структурних особливостей посівів рослин - фітоценозів, де формується реальний урожай.

### **3. Роль інтенсивності світла в світлокультурі рослин**

Швидкість фотосинтезу, а отже і накопичення біомаси рослин, залежать від кількості енергії, що трансформується в біохімічний зв'язок. Оскільки трансформація енергії світла в енергію хімічних зв'язків при фотосинтезі є наслідком поглинання квантів світла, то можна вважати, що чим більше квантів містить променистий потік, тим вище може бути фотосинтез рослин.

Кількість квантів світла в променистих потоках одного і того ж спектрального складу має лінійний зв'язок з інтенсивністю випромінювання, яка характеризує потужність променевого потоку. Якщо променисті потоки мають різний спектральний склад, то потік випромінювання з меншою кількістю квантів може мати велику інтенсивність, ніж потік випромінювання, де квантів більше, але в енергетичному відношенні вони більш «дрібні». Так, наприклад, кванти синього світла, згідно з формулою (1), в енергетичному відношенні більш «великі», ніж кванти червоного світла. Тому при рівній кількості квантів інтенсивність синього світла буде вище, ніж червоного. Паралельно з терміном

«інтенсивність» часто використовується термін «опромінення». У світлокультурі ці два терміни зазвичай використовують як синоніми.

Між інтенсивністю світла і видимим фотосинтезом (далі по тексту просто «фотосинтезом») існує залежність, яка часто зображується графічно у вигляді світлової кривої фотосинтезу (рис.2). Бачимо, що зв'язок між фотосинтезом і інтенсивністю світла може сильно відрізнитися в залежності від величини останньої. Розрізняють декілька ділянок кривої, що характеризує таку залежність.

Розглянемо найбільш важливі ділянки цієї кривої.

При низькій інтенсивності світла сумарної енергії квантів світла недостатньо, щоб процес фотосинтезу забезпечив енергетичні потреби життєдіяльності рослин. У цих умовах основна енергія для підтримки життєдіяльності рослин черпається за рахунок розпаду раніше синтезованих речовин. Цей процес називається «диханням рослини».

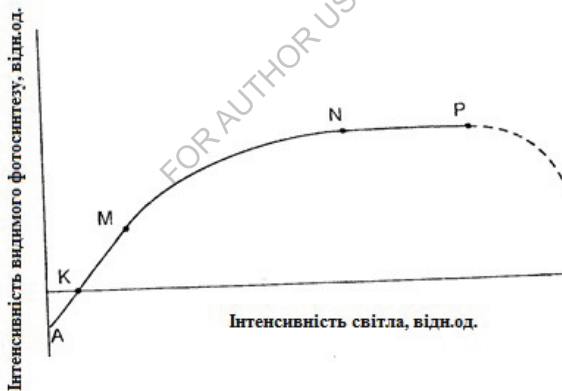


Рис. 2. Типова світлова крива видимого фотосинтезу.

Умовно прийнято вважати, що оскільки при диханні енергія для рослин витрачається шляхом руйнування (деструкції) частини синтезованих раніше за рахунок фотосинтезу з'єднань, а при фотосинтезі енергія накопичується в процесі синтезу органічних сполук, то ці процеси для балансу енергії мають протилежні знаки - позитивний для фотосинтезу і негативний для дихання. У зв'язку

з цим іноді вживають термін «негативний фотосинтез», коли мова йде про виділення енергії при диханні. Цей «негативний фотосинтез» відповідає на рис.2. ділянці кривої АК і діапазону інтенсивності світла від 0 до деякого значення К. Точка К часто називається світловою компенсаційною точкою фотосинтезу. Особливість цієї точки пов'язана з тим, що процеси фотосинтезу врівноважуються дихальними процесами.

З подальшим зростанням кількості квантів світла в потоці випромінювання інтенсивність світла зростає, збільшується фотосинтез, а отже, і накопичення біомаси рослин. Основна енергія, що витрачається на забезпечення життєдіяльності рослин, надходить уже за рахунок процесу фотосинтезу, іншими словами, видимий фотосинтез стає позитивним. Спочатку цей процес має лінійну залежність. Вона зберігається до тих пір, поки збільшення квантів світла в променистому потоці супроводжується таким же збільшенням використання їх енергії на побудову біомаси рослиною. Відповідний цій ділянці світлової кривої фотосинтезу позначений на рис.2. як відрізок КМ.

Однак резерви засвоєння рослиною енергії на фотосинтез за рахунок збільшення кількості спожитих квантів світла не безмежні. Ці резерви поступово вичерпуються, що характеризується ділянкою нелінійної залежності фотосинтезу рослин від інтенсивності світла (рис. 2., відрізок MN).

Коли засвоєння енергії додаткових квантів світла на фотосинтез припиняється, настає стадія світлового насичення. На рис.2. їй відповідає відрізок NP, званий «плато насичення». Тут зростання інтенсивності світла не змінює величини фотосинтезу.

Якщо продовжувати збільшувати інтенсивність світла, то, починаючи з її певного значення, надмірна кількість квантів світла приводить до шкідливого ефекту на фотосинтетичний апарат рослин, в результаті чого їх фотосинтез знижується. Ця ділянка світлової кривої фотосинтезу часто називають ділянкою «світлового інгібування фотосинтезу». На рис.2. він показаний пунктиром.

В умовах світлокультури інтенсивність світла є одним з найбільш доступних в практичному плані способів світлового управління величиною і якістю врожаю рослин. Однак навіть при сприятливому спектральному складі світла правильний вибір його

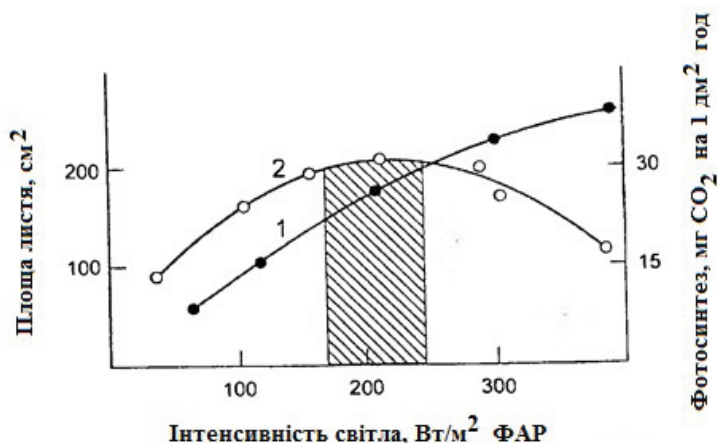
інтенсивності може зіграти вирішальну роль в кількості і якості одержуваної рослинної продукції. Справа в тому, що інтенсивність світла грає в життєдіяльності рослин двояку роль. З одного боку, зміна інтенсивності світла грає субстратну роль, збільшуючи або зменшуючи світлове живлення рослин. З іншого боку, в процесі зміни інтенсивності світла змінюється якісна спрямованість багатьох фізіологічних процесів: зростання, біохімічних синтезів, закладки репродуктивних органів і ін. Відомо, що при використанні в світлокультурі низьких рівнів опромінення часто формуються витягнуті рослини, у коренеплідних форм, наприклад редиски, коренеплоди утворюються погано, рослини формують квітконосні стебла, а у таких плодоносних рослин, як томати і огірок, багато квітів обпадають, що утворюються плоди невеликі, їх смакові якості низькі. У той же час використання досить високих рівнів опромінення дозволяє не тільки збільшити урожай, але і отримувати великі плоди високої якості на тлі значного зниження термінів вегетації рослин.

За ступенем важливості після фотосинтезу для життєдіяльності рослин часто відзначають ростові процеси. Під ростовими процесами розуміють збільшення лінійних розмірів рослин, швидкість накопичення біомаси. Тому скоординувати оптимальним чином фотосинтез і ріст - одна з головних умов отримання хорошого врожаю. У зв'язку з цим інтенсивність світла грає ключову роль в забезпеченні такої координації.

На рис.3. показані принципові відмінності в залежності швидкості фотосинтезу і швидкості росту площі листя рослин від величини інтенсивності світла. Як правило, світлове насичення ростових процесів настає швидше, ніж процесів фотосинтезу.

Таким чином, використання досить високого опромінення в умовах світлокультури може в ряді випадків виявитися корисним. Однак подібний підхід не є єдиним для всіх видів рослин, які вирощують в умовах світлокультури. Наприклад, для зелених культур, у яких в їжу може вживатися вся надземна біомаса, використання високих опромінення дасть тільки негативний ефект, оскільки зростання листової поверхні сповільниться, листя в значній мірі втратять необхідні для вживання в їжу якості (з'являться жорсткі жовтуваті листя замість ніжно зелених і соковитих листя при знижених опромінення).



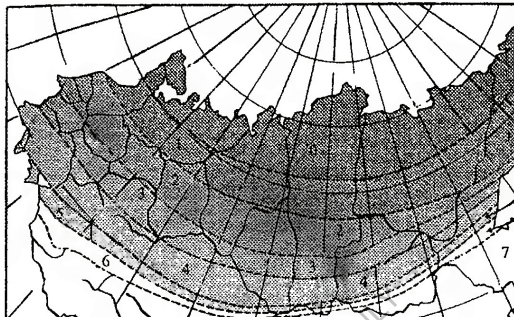


**Рис.3.** Світлові криві фотосинтезу (1) і зростання площі листа (2) рослин редису.

Важливим моментом в правильному виборі інтенсивності штучного світла є облік природної складової сонячного світла. Ця ситуація повинна враховуватися в теплицях середньої і південної географічних широт країни. З цією метою територія країни умовно розбита на 8 світлових зон, в залежності від середньої величини інтенсивності природної радіації (рис.4.). З урахуванням такої класифікації формулюються рекомендації по установці джерел світла певної потужності і їх розміщення в теплиці в залежності від світлової зони, де вони знаходяться.

Величина інтенсивності опромінення рослин в теплиці складається з двох складових: природного та штучного. У теплицях, розташованих в південних регіонах країни, внесок природної складової буде вище, ніж для теплиць, розташованих в середній смузі, а тим більше в її північних регіонах. Тому виникла необхідність систематизації даних про співвідношення природного та штучного складових при опроміненні рослин в теплицях. Така інформація важлива, перш за все, з огляду на дефіцит електроенергії та високу вартість джерел штучного світла і освітлювальної техніки. Крім того, неправильно підібрані світлові режими опромінення можуть призвести до недобору врожаю рослин при нестачі штучного світла або до

необґрунтованого подорожчання собівартості рослинної продукції при його надлишку. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано зонування території країни за сумами ФАР за місяці з найменшою опромінення, тобто за грудень і січень. Вся



**Рис.4.** Схема умовного поділу території колишнього СРСР на світлові зони.

територія країни була умовно розділена на 8 світлових зон: від 0 до VII (рис.4.). На підставі такого зонування можна було визначити, чи потрібно досвічування розсади або рослин, вирощуваних в теплиці в зимовий період, що знаходиться в даній світловій зоні. Для проведення такого аналізу були запропоновані мінімальні нормовані рівні (природної і штучної) світлової енергії, яка діє на розсаду і дорослі рослини. У той же час з'ясувалося, що недостатньо знати тільки нормовані рівні сонячної енергії. Необхідно знати також мінімально допустимі рівні опромінення ФАР і тривалість опромінення рослин. Наприклад, якщо рівень опромінення для вирощування розсади задовольняє заданому значенню, але тривалість його добового впливу на рослини недостатня, то розсада формується ослабленою. Така ситуація особливо характерна для південних регіонів країни (VII світлова зона). У зв'язку з цим було запропоновано враховувати як контрольні значення інтенсивності опромінення рослин, так і контрольні значення тривалості фотоперіоду. Фактично було запропоновано враховувати контрольні значення множників, внесок яких складає кількість енергії, яка приходить до рослин в

області ФАР, тобто дози опромінення рослин. Під дозою опромінення рослин в даному випадку розуміють добуток величини інтенсивності ФАР на тривалість її впливу. Таким чином, значення дози (B) представляється як

$$D = I \cdot t, \quad (3)$$

де I- інтенсивність ФАР, t-час її впливу на рослину.

Оскільки в тепличному рослинництві інтенсивність ФАР часто вимірюють в Вт/м<sup>2</sup>, а час опромінення рослин протягом фотоперіоду - в годинах, то розмірність дози в даному випадку буде Вт·год/м<sup>2</sup>.

Слід мати на увазі, що однакові дози ще не означають рівні світлові умови для вирощування рослин. У кількісному відношенні доза опромінення рослин, відповідна їх високої продуктивності при правильно обраних інтенсивності і тривалості опромінення, може бути отримана і іншим шляхом. Так, однакові дози опромінення рослин можна, наприклад, отримати при низьких рівнях опромінення, відповідних слабкому фотосинтезу і тривалого фотоперіоду або, навпаки, при високих опроміненнях і дуже короткому фотоперіоді. Зрозуміло, що у всіх цих випадках однакові дози опромінення рослин відповідають абсолютно різним величинам їх продуктивності. Тому вибір інтенсивності світла і тривалості фотоперіоду повинні знаходитися в певних діапазонах. Згідно розробкам Державного науково-дослідного і проектного інституту по створенню об'єктів зберігання, переробки плодоовочевої продукції, теплиць і споруд штучного клімату оптимальне нормоване опромінення в теплиці при вирощуванні розсади дорівнює 40 Вт/м<sup>2</sup> ФАР з фотоперіодом 14 годин, а для вирощування рослин на продукцію - 100 Вт/м<sup>2</sup> ФАР з фотоперіодом 16 годин. В цьому випадку оптимальне добова кількість опромінення (доза) для розсади складе 560 Вт·год /м<sup>2</sup>, а для вирощування рослин на продукцію - 1600 Вт·год/м<sup>2</sup> ФАР. Допускаються відхилення від цих оптимальних значень для розсади до 400-250 Вт·год/м<sup>2</sup> ФАР при коливаннях тривалості опромінення розсади в 0-III світлових зонах не менше 12-16 годин на добу і не менше 12 годин в IV-VI світлових зонах, а для

овочевих культур в період плодоношення до 900 Вт·год/м<sup>2</sup> ФАР при коливанні тривалості фотоперіоду в діапазоні 12-16 годин.

З огляду на це Державним науково-дослідним і проектним інститутом по створенню об'єктів зберігання, переробки плодовоовочевої продукції, теплиць і споруд штучного клімату запропоновано удосконалений підхід в поділі території країни на різні світлові зони з урахуванням, як інтенсивності, так і тривалості опромінення рослин для будь-якого місяця на рік (табл.1). На підставі даних цієї таблиці може бути отримана інформація по вибору режиму опромінення (спільне опромінення або тільки природне світло) для теплиць, розташованих на різній географічній широті.

**Таблиця 1.**

Зонування території країни за географічною широтою (через 4) за критерієм вибору або природного режиму опромінення (Е), або спільного режиму опромінення (С), для розсади (дані чисельника) і дорослого культури (дані знаменника)

Широта ° с.ш.	Зони	Місяці											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
82-78	1	С С	С С	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С	С С
78-74	2	С С	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С	С С
74-70	3	С С	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С	С С
70-66	4	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С
66-62	5	С С	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С
62-58	6	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С
58-54	7	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С
54-50	8	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С
50-46	9	С С	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С	С С
46-42	10	С С	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	Е Е	С С	С С

Примітки: розрахунки виконані виходячи з нормативних показників Державного науково-дослідного і проектного інституту по створенню об'єктів зберігання, переробки плодовоовочевої продукції, теплиць і споруд

штучного клімату. Для добової кількості приходить ФАР для розсади - 400 Вт·год/ м<sup>2</sup>, для дорослої культури - 900 Вт·год/м<sup>2</sup>; зона вирощування розсади при природному опроміненні показана суцільною лінією, а дорослої культури - штрихованою.

За даними цієї таблиці видно, на якій географічній широті в певну пору року можливо виробництво розсади або овочів тільки на природному світлі або необхідно додаткове штучне опромінення. Дані табл.1 можуть бути використані і для типового проектування теплиць, з урахуванням розміщення в них опромінювальних пристроїв із заданими світлотехнічними характеристиками.

Таким чином, немає однозначного підходу у виборі інтенсивності світла для вирощування рослин в умовах світлокультури. Вибір залежить від виду рослин, цілей їх вирощування, а також від ряду інших факторів, серед яких велику роль грають оптичні властивості рослин.

### **Контрольні запитання**

- 1. Які основні етапи розвитку світлокультури Ви знаєте? Охарактеризуйте основні риси кожного етапу.*
- 2. Як змінилися акценти в розвитку світлокультури в даний час в порівнянні з попереднім періодом?*
- 3. Якими є роль окремих піддіапазонів спектру оптичного випромінювання, що мають для рослин основне субстратно-регуляторне значення ?*
- 4. Охарактеризуйте роль інтенсивності світла в світлокультурі.*
- 5. Чим, на Ваш погляд, відрізняється застосування світлокультури в північних регіонах країни від її використання в середній смузі?*
- 6. У чому Ви бачите перспективи світлокультури в XXI столітті?*

## **ТЕМА–6. ВСТУП ДО КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ І ТЕХНІКИ ЛАЗЕРІВ**

**Квантова електроніка**, як новий напрямок у фізиці, виникла на межі електроніки, оптики, квантової фізики та ряду інших фізичних дисциплін і без неї уже неможливо представити собі розвиток сучасного суспільства.

**Квантова електроніка** – це область фізики, яка вивчає методи підсилення і генерації електромагнітного випромінювання шляхом використання індукованого випромінювання в термодинамічно нерівноважних квантових системах; властивості таких підсилювачів і генераторів та їх застосування.

Слід відмітити, що термін **«лазер»** виник ще у 1959 р. до моменту запуску першого лазера і був запропонований Гулдом Р.К. Цей термін є абрєвіатурою англійського виразу «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», яка означає **підсилення світла в результаті вимушеного випромінювання квантів**.

Розглянемо ряд фізичних термінів з курсу оптики, знання яких є принципово важливим для вивчення квантової електроніки і які широко використовуються в ній.

**Квантовий перехід** – стрибкоподібний (миттєвий) перехід квантової системи з одного енергетичного рівня на інший.

**Час життя на енергетичному рівні** – середня тривалість перебування атома, іона чи молекули в стані з деякою визначеною енергією.

**Когерентність** – це узгоджене протікання в часі декількох коливальних або хвильових процесів. Коливання називають **монохроматичними** (чи гармонійними) якщо воно описується виразом  $x = A \cos(\omega t + \phi)$ , причому амплітуда ( $A$ ), частота ( $\omega$ ) і фаза ( $\phi$ ) повинні бути сталими.

**Часова когерентність хвиль** – характеризує постійність (чи заданий закон зміни) в часі їх основних характеристик (амплітуди, частоти і фази).

**Час когерентності** – найбільший часовий інтервал, на протязі якого зберігається постійність (чи деякий закономірний зв'язок) характеристик коливання або хвилі.

**Просторова когерентність** – термін, який характеризує сталість або зміну за відомим законом основних характеристик хвилі в просторі.

**Довжина когерентності** – віддаль «а» в напрямку поширення хвилі, на якому характеристики хвилі або зберігаються постійними або змінюються за відомим законом. Довжина когерентності «а» і час когерентності « $\tau$ » пов'язані між собою співвідношенням:  $a = c \tau$ .

**Монохроматичність** – це ступінь близькості коливань до ідеальних, що описуються виразом  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ , де  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  – сталі. Реальні коливання і хвилі не є монохроматичними, але їх можливо представити у вигляді суми ідеальних монохроматичних коливань чи хвиль. Чим більша монохроматичність, тим у меншому інтервалі частот групуються частоти монохроматичних складових.

**Спонтанне і вимушене випромінювання.** Квантові переходи можуть відбуватися *самовільно* (спонтанно) і *вимушено*. При спонтанному випромінюванні фотона воно не залежить від зовнішньої дії на квантову систему. Вимушений же перехід відбувається під дією зовнішнього випромінювання частотою  $\nu$  (де  $h\nu = E_i - E_k$ ). Суттєво, що поряд з поглинанням квантів світла (перехід  $E_k - E_i$ ), можливим є також вимушене випромінювання фотонів (процес, зворотний до поглинання). На відміну від спонтанного випромінювання, при якому поляризація і напрям руху фотонів можуть бути довільними, при вимушеному випромінюванні фотон має ту ж поляризацію і напрям руху, що і вимушуючий фотон. Частота вимушеного випромінювання теж точно дорівнює частоті вимушуючого випромінювання.

## **1. Становлення квантової електроніки і техніки лазерів**

Днем народження лазера вважається 16 травня 1960 р., оскільки ця дата зафіксована в робочому журналі Меймана Т.Н. – американського фізика, якого і вважають винахідником лазера. Цей результат був опублікований ним в серпні у статті «Stimulated Optical Radiation in Ruby [Maiman T.H. Nature.1960. V.187. P.493]. Мейман Т.Н. одержив і пояснив ефект звуження спектральної лінії випромінювання кристалу синтетичного рубіну та збільшення на декілька порядків інтенсивності випромінювання, яке при цьому

спостерігалось. Розроблений Мейманом Т.Н. пристрій містив всі три необхідні та достатні складові для одержання лазерної генерації оптичного когерентного випромінювання: активне середовище (середовище з інверсною населеністю енергетичних рівнів), систему оптичного накачування та відкритий оптичний резонатор, який забезпечував додатній зворотний зв'язок і перетворював підсилювач оптичного випромінювання в генератор.

В СРСР перший лазер на кристалі рубіну був запущений в Державному оптичному інституті (ДОІ) ім. Вавілова С.І. Міністерства оборонної промисловості (науково дослідна група під керівництвом Хазова Л.Д.) і Фізичному інституті ім Лебедева П.Н. (група під керівництвом Галаніна М.Д.).

Постановці і розвитку робіт з квантової електроніки в Ленінграді сприяв значний науковий заділ в дослідженнях з спектроскопії та люмінесценції, в тому числі і кристалів, в області фізичної оптики та імпульсних джерел світла і школи в області оптотехніки, технології, конструювання і активних середовищ лазерів. Тому перший в СРСР лазер (на кристалі рубіну) і був запущений в ДОІ ім. Вавілова С.І. 2 червня 1961 р.. В цих експериментах Хазова Л.Д. і Белоусової І.М. було виявлено, що при збільшенні енергії лампи накачки з 550 Дж до 2200 Дж спостерігався чіткий перехід від люмінесценції до генерації оптичного випромінювання у вигляді променя світла з малою розбіжністю.

Слід відмітити, що лазер виник не на пустому місці, оскільки перший камінь в його створення був закладений ще в доповіді Планка М. 14 грудня 1900 р., присвяченій квантовій теорії світла і в якій була приведена знаменита формула:

$$E = h \cdot \nu , \quad (1)$$

(де:  $E$  – енергія кванта світла,  $h$  – стала Планка,  $\nu$  – частота світла), яка лежить в основі всієї квантової фізики.

В подальшому квантова теорія світла одержала розвиток в праці Ейнштейна А. з фотоефекту (1905 р.). В своїй праці, яка була опублікована в 1916 р., Ейнштейн А. на основі загальних термодинамічних міркувань вивів формулу Планка для розподілу випромінювання абсолютно чорного тіла за частотами, в якій



вперше ввів поняття вимушеного (або індукованого) випромінювання збуджених атомів під впливом зовнішнього електромагнітного поля, яке стало фундаментом всієї квантової електроніки. Ймовірність вимушеного випромінювання пропорційне густині випромінювання, що падає на квантову систему (атом, іон, молекулу тощо). При цьому, частота випромінювання квантової частинки рівна частоті падаючого випромінювання (кванта світла); просторові направленості, поляризація падаючого і випроміненого квантів є тотожними. Ця властивість вимушеного випромінювання дозволяє підсилювати світло, якщо його пропускати через шар квантових частинок, які знаходяться переважно в збудженому стані. Ейнштейном А. були введені коефіцієнти спонтанного ( $A_{ik}$ ) і вимушеного ( $B_{ik}$ ) випромінювання та вимушеного поглинання ( $B_{ki}$ ), які пов'язані між собою наступними співвідношеннями:

$$g_i B_{ik} = g_k B_{ki}, \quad A_{ik} = (8\pi\nu^2 / c^3) h\nu B_{ik}, \quad (2)$$

В 1920-х роках були спроби експериментального виявлення вимушеного випромінювання в оптичному діапазоні спектру. Для оптичних переходів атомів чи молекул верхні рівні в більшості випадків практично не заселені і роль вимушеного випромінювання є незначною. Тому для виявлення вимушеного випромінювання необхідно перевести квантову систему в інвертований стан, коли заселеність верхнього рівня переважає заселеність нижнього. При цьому може спостерігатися підсилення світла.

В середині 1920-х років англійським фізиком Діраком П. були розроблені детальні теоретичні представлення про процеси випромінювання і поглинання світла, що дозволило строго обґрунтувати існування вимушеного випромінювання.

В 1928 р. Ладебург А. і Конферман Е. дослідили від'ємну дисперсію світла в газовому розряді у неоні. На основі цих досліджень вони припустили, що реалізація інверсного стану можлива за допомогою резонансного збудження атомів, що пізніше і було реалізовано в перших газорозрядних лазерах.

В 1939 р. аналогічний висновок зробив і Фабрикант В.А., досліджуючи вже не дисперсію, а аномальне поглинання світла.

Він у своїй дисертації з дослідження механізму випромінювання газового розряду наводить результати експериментів, що свідчать про існування від'ємної абсорбції і можливості збільшення інтенсивності випромінювання в напрямку пучка світла, яке падає на це середовище.

Але інверсна населеність є лише необхідною, а не достатньою умовою одержання лазерної генерації. Оскільки оптикам, на відміну від радіоспектроскопістів, було незвичним саме поняття додатного зворотного зв'язку, тому спочатку були розроблені мазери, а не лазери.

Першим кроком з створення приладів квантової електроніки стали мазери (квантові генератори мікрохвильового діапазону), ідею про принципову можливість створення якого, висунули Басов Н.Г. і Прохоров А.М. в 1954 р. [ЖЭТФ. 1954. Т.27. С.431]. Перший же мазер був створений американськими вченими Гордоном Дж., Цайгером Х., Таунсом И. [Phys. Rev. 1954. V.95. P.285].

Затримці в поширенні принципів квантової електроніки з мікрохвильового в оптичний діапазон сприяла також відсутність чіткого розуміння в середині 1950-х років того, що вимушене випромінювання є когерентним. Це пов'язано з низькою когерентністю оптичного випромінювання, оскільки випромінювачі (атоми чи молекули) це квантові системи, які сильно взаємодіють між собою, і від них неможливо одержати на помітних проміжках часу монохроматичний сигнал, що відповідає тривалості цього проміжку. Тобто, лазерне випромінювання, внаслідок малої довжини хвилі, відрізняється від мікрохвильового більш яскраво вираженою роллю когерентності.

Після створення мазера основними завадами при переході в оптичний діапазон стало різке збільшення імовірності спонтанних переходів, що приводить до труднощів в досягненні інверсії та неможливості реалізації відомими методами додатного зворотного зв'язку.

В 1955 році Бломберген Н., Басов Н.Г. і Прохоров А.М. запропонували метод створення інверсії не шляхом селекції збуджених і незбуджених молекул в молекулярному пучку шляхом дії на молекули зовнішнього електромагнітного випромінювання на резонансній частоті. Цей метод, який одержав

назву «метод трьох рівнів», виявився універсальним незалежно від енергії кванта в будь-якій багаторівневій системі.

В цей же час була подолана і проблема створення оптичного резонатора. Проблема полягала в тому, що об'ємні резонатори, які використовувались в мазерах, не могли використовуватися в оптичному діапазоні, оскільки розміри об'ємного резонатора повинні бути співмірними з довжиною хвилі генерації. Оскільки, остання в оптичному діапазоні менша за 1 мкм, то застосування об'ємного резонатора в цьому випадку втрачало зміст. В 1958 р. американці Шавлов А.Л., Таунс Ч.Х. і Прохоров О.М. запропонували використати як резонатор пару плоских паралельних дзеркал, які назвали відкритим резонатором. При цьому довжина хвилі випромінювання була значно меншою розмірів резонатора та були встановлені умови його самозбудження і вираз для добротності.

Створення відкритого оптичного резонатора завершило побудову фундаменту квантової електроніки і відкрило шлях до створення Мейманом першого лазера в 1960 р. Після цього Джаваном А., Беннетом У.Р., Херітоном Д.Р. був запущений перший газорозрядний лазер на He-Ne суміші низького тиску [US Patent 3,149,290 (application date: December 28, 1960, patent date: September 15, 1964)].

В подальшому протягом одного року повідомлення про одержання нових генераційних переходів слідували десятками. Ці початкові дослідження часто були лише демонстраційними, при яких досліджували властивості самого лазерного випромінювання. Проте для реалізації унікальних властивостей лазерів на практиці та їх широкого застосування лише фундаментальних досліджень було недостатньо. На часі став розвиток зовсім нових технологій, яких досі в світі не існувало.

Зокрема, важливо було почати роботи з пошуку нових матеріалів для активних середовищ у всіх можливих агрегатних станах – твердому, рідкому, газоподібному і плазмовому, які мають відповідні для генерації схеми рівнів і швидкості релаксації засеності енергетичних рівнів. При цьому необхідно було розробити методи одержання цих матеріалів при високих вимогах до їх чистоти і структурної однорідності. Сюди ж належить і розробка прецизійних методів полірування оптичних деталей з

високим класом точності при витримці строгої паралельності поверхонь; створення нових джерел накачки, нових методів наплення дзеркал тощо.

Нобелівська премія з фізики за «фундаментальні роботи в області квантової електроніки, які привели до створення випромінювачів на мазерно-лазерному принципі» була присуджена в 1964 р. американському фізику Чарльзу Таунсу та радянським фізикам Миколі Геннадієвичу Басову і Олександрю Михайловичу Прохорову.

Хоча до складу лауреатів цієї премії і не ввійшли вчені, які першими створили реально діючі лазери (Мейман Т.Н., Джаван А., Беннет У.Р.), персональний вибір лауреатів Нобелівської премії з фізики за 1964 р. був абсолютно обґрунтованим і правильним.

Серед лазерів особливе місце належить напівпровідниковим лазерам, оскільки вони складають на даний час біля 90 % всіх комерційних лазерів.

Ще в 1959 р. Басов М.Г., Вул Б.М., Попов Ю.М. вперше запропонували використати в лазерах напівпровідники як активне середовище з оптичною чи електричною накачкою. В статті [Басов М.Г., Крохин О.Н., Попов Ю.М. ЖЭТФ. 1961. Т.40. С.1879] вперше був запропонований метод інжекції носіїв струму через р – п перехід, який виявився дуже перспективним і привів до створення лазерних діодів для широкого практичного використання.

Проте перший напівпровідниковий лазер був запущений американським вченим Холлом Р.Н. [Hall et al. Phys.Rev.Lett. 1962. V.9. P.366.], а в праці радянських фізиків [Наследов Д.Н. и др. ФТТ. 1962. Т.4. С.1062] спостерігалось лише звуження лінії люмінесценції за рахунок вимушеного випромінювання (генерація була відсутня, оскільки в експериментах не використовувався резонатор).

В 1970 р. групою під керівництвом Алферова Ж. І. був створений перший напівпровідниковий лазер на основі гетероструктури в системі AlGaAs-GaAs, який випромінював в неперервному режимі при кімнатній температурі [Алферова Ж. І., Казарінов Р.Ф. Авторське свідоцтво. №181737, пріорітет від 30.03.1963 р.]. За фундаментальні праці в області інформаційних і комунікаційних технологій Алферову Ж. І., Кремеру Г., Кілбі Д.

була присуджена Нобелівська премія з фізики за 2000 р. з формулюванням відносно Алферова Ж. І., Кремер Г. «за розвиток напівпровідникових гетероструктур, що застосовуються в швидкісній оптоелектроніці».

## 2. Основні типи активних середовищ лазерів

На даний час лазерна генерація одержана в лабораторних умовах на спектральних лініях різних матеріалів, які є активним середовищем. Проте більшість з них представляє лише академічний інтерес, оскільки вони вимагають особливих умов для своєї роботи або є малопотужними, малоефективними чи випромінюють в спектральних діапазонах, де відсутні вікна прозорості в атмосфері. Виходячи з цього, класифікацію лазерів роблять в першу чергу для лазерів, які знайшли широке застосування в різних областях, або такі, що випускаються на продаж різними фірмами.

Лазери поділяються за типами в залежності від їхнього робочого середовища. Велика різноманітність властивостей активних речовин вимагає різних способів накачування і приводить до великої кількості різних механізмів генерації, що значно утруднює введення досить загальної простої класифікації лазерів. Тому лазери можливо класифікувати за наступними ознаками: за агрегатним станом активного середовища (газові, твердотільні, напівпровідникові), методам накачування (газорозрядні, газодинамічні, хімічні тощо), часовому режиму генерації (неперервні, імпульсні, імпульсно-періодичні), частотному режиму генерації (одно- багатомодові, одночастотні), рівню вихідної потужності чи енергії в імпульсі, експлуатаційним характеристикам (ККД, масогабаритні параметри).

**Газові лазери** збуджуються переважно газовими розрядами різного типу (неперервним, імпульсним, самостійним, несамостійним). Для одержання високої потужності генерації використовують **газодинамічне накачування**. При **хімічному** збудженні інверсія створюється в результаті хімічних реакцій, що продукують збуджені атоми, молекули чи хімічні радикали. **Оптичне накачування** газових лазерів може бути ефективним лише коли джерело оптичного випромінювання досить монохроматичне (наприклад, лазерне випромінювання).

В залежності від складу і властивостей газів лазери поділяються на лазери на нейтральних атомах, іонах чи молекулах (стійких чи нестійких в основному стані).

Активним середовищем **твердотільних лазерів** є кристалічні або аморфні тіла, у матриці яких рівномірно розподілені іони домішок (перехідних металів, актиноїдів чи рідкоземельних елементів). Накачування цих лазерів здійснюється оптичним методом. До твердотільних лазерів відносяться також лазери на центрах забарвлення.

**Рідинні лазери.** Активним середовищем рідинних лазерів є різні розчини органічних барвників та деякі металорганічні і неорганічні рідини, які активовані іонами рідкоземельних елементів. Ці лазери поєднують властивості твердотільних і газових лазерів і мають перевагу в можливості плавного перестроювання довжини хвилі ЛВ. Накачування рідинних лазерів здійснюється оптичним методом з використанням потужних ламп і лазерів видимого та УФ діапазону спектру.

**Напівпровідникові лазери.** Інверсія заселеності в цих лазерах виникає на переходах між станами в електронних енергетичних зонах напівпровідникового кристалу. Основним способом накачування напівпровідникових лазерів є інжекція струму через р-п перехід або гетероперехід, а додатковими електричний пробій, електронний пучок і оптичне накачування.

Незважаючи на таку різноманітність лазерів, в них завжди можливо виділити три необхідні елементи: активне середовище, систему накачки і систему додатного зворотного зв'язку.

На даний час розвиток техніки лазерів та їх комплексів дозволяє виготовляти цілі системи лазерів для застосування в медицині (хірургія, урологія, офтальмологія), біології та хімії. Так, лазери медичного призначення характеризуються наступними параметрами:

- діапазон довжин хвиль 0.1 – 10 мкм;
- діапазон густини енергії генерації ( $1 - 10^{-3}$ ) Дж см<sup>-2</sup>;
- діапазон густини потужності генерації (18 порядків): ( $10^{-3} - 10^{15}$ ) Вт см<sup>-2</sup>;
- тривалість генерації (16 порядків): від неперервного режиму ( $\approx 10$  с) до фемтосекундних імпульсів.

За останні 10-20 років значного розвитку зазнали волоконні лазери, які були запропоновані американським фізиком Снітцером Е. ще в 1961 р. [Snitzer E. Phys.Rev.Lett. 1961. V.7. P.444]. Але практичне застосування вони одержали лише після 1974 р., коли неефективна лампова накачка була витіснена накачкою лазерними діодами. На даний час провідні позиції з розробки і виготовлення волоконних лазерів займає міжнародна корпорація «IPG Photons», яка випускає серії волоконних лазерів з діодним накачуванням потужністю до 50 кВт. Волоконні лазери досить компактні та відрізняються великою надійністю в роботі і простотою в обслуговуванні.

За рахунок використання діодного накачування одержали нове життя і твердотільні лазери, які стали більш ефективними і надійними. Ці успіхи квантової електроніки були б неможливими без розвитку нових технологій створення напівпровідників та світловодів.

Лідером у створенні потужних твердотільних лазерів є США. В Ліверморській лабораторії створено твердотільні лазери з активними елементами великого діаметру з нового матеріалу – оптичної кераміки, яка має склад, аналогічний складу кристалу ітрію-алюмінієвого гранату з неодимом. Фірма «Нортроп-Грумман» виготовила демонстраційний макет транспортабельної лазерної системи з потужністю генерації, яка більша за 105 кВт, а якість променя краща трьох дифракційних границь.

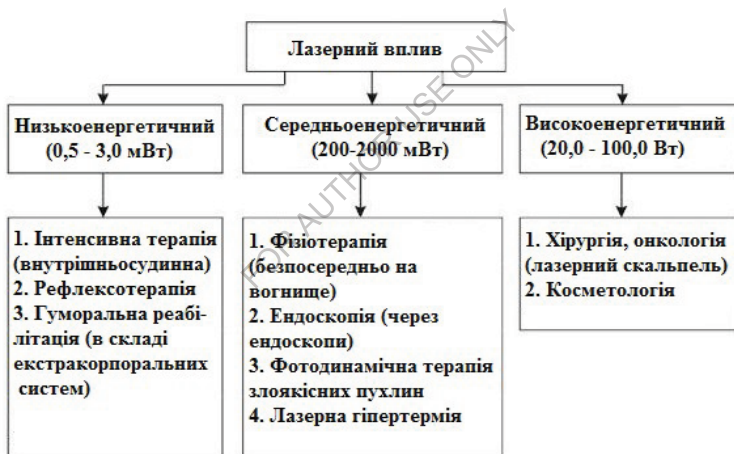
Розвиток техніки потужних лазерних систем дозволив виділитись лазерному термоядерному синтезу в окремий напрямок квантової електроніки. Поштовхом до цих досліджень стало створення лазерів з модульованою добротністю резонатора в наносекундному діапазоні часів [Mc. Clung F.J., Hellwart R.W. J.Appl.Phys. 1962. V.33. P.828.]. За допомогою таких лазерів стало можливим проводити швидке нагрівання потужним когерентним випромінюванням невеликої мішені на основі важких ізотопів водню. Ця ідея, яка була висунута Басовим М.Г. і Крохіним О.М. у 1963 р., поклала початок досліджень з інерційного термоядерного синтезу. Найбільш потужний лазер (США) дозволяє одержувати енергію в імпульсі генерації (УФ-область спектру, III – гармоніка неодимового лазера) до 1.8 МДж при тривалості імпульсу генерації на рівні декількох наносекунд. Така енергія в імпульсі

генерації вже наближається до порогу запалювання керованої термоядерної реакції синтезу

### 3. Види лазерного впливу в медицині і типи хірургічних лазерів

Схема видів лазерного впливу при різних енергіях світлового потоку представлена на рис.1.

*Хірургічні лазерні системи* забезпечують: ефективну контактну і безконтактну деструкцію біотканини; сухе операційне поле; мінімальне пошкодження навколишніх тканин; ефективний гемо- та аеростаз; купірування лімфатичних проток; високу стерильність і абластичність; сумісність з ендоскопічними і лапароскопічними інструментами.



**Рис.1.** Види лазерного впливу в залежності від енергії світлового потоку

Це дає можливість ефективно використовувати хірургічні лазери для виконання найрізноманітніших оперативних втручань в урології, гінекології, оториноларингології, ортопедії та нейрохірургії. За своїми фізичними властивостями найкращим вибором для хірурга є гольмівий лазер.



**Гольмієвий лазер.** Довжина хвилі випромінювання гольмієвого лазера становить 2,09 мкм. Лазерне випромінювання проникає в м'які біотканини на глибину близько 0,4 мм. Це означає, що вплив на прилеглі тканини буде незначним і не слід побоюватися небажаних великих супутніх опіків і сильного некрозу навколо лазерної рани. Кварцове скло прозоре на довжині хвилі випромінювання гольмієвого лазера, що дає можливість використовувати тонке гнучке кварцове оптичне волокно для доставки випромінювання гольмієвого лазера до об'єкта впливу. Режим роботи гольмієвого лазера імпульсний, тривалість імпульсу становить 300-600 мкс. Частота повторення імпульсів може змінюватися в діапазоні від 1 до 20 Гц. Енергія імпульсу - до 3 Дж при середній потужності вихідного випромінювання 20-30 Вт.

Імпульсний режим значно зменшує час нагрівання біотканини і, отже, опікову реакцію організму. При цьому, пікова потужність випромінювання в 5-10 кВт дає можливість швидко випаровувати тканину практично без фази повільного нагрівання. У фізиці такий процес називається адіабатичним, який відбувається без теплообміну з оточуючими тілами. Яскраво виражені властивості гольмієвого лазера випаровувати рідини дозволяють використовувати його для випаровування новоутворень різної локалізації. Продуктивність залежить від частоти повторення і енергії імпульсу лазерного випромінювання.

**CO<sub>2</sub>-лазер.** Лазер на вуглекислому газі - перший хірургічний лазер, який активно використовується починаючи з 1970-х років по теперішній час. Високе поглинання в воді і органічних сполуках (типова глибина проникнення - 0,1 мм) сприяє використанню CO<sub>2</sub>-лазера для широкого спектру хірургічних втручань, в тому числі в гінекології, оториноларингології, загальній хірургії, дерматології, шкірно-пластичної та косметичної хірургії.

Поверхневий вплив випромінювання лазера дозволяє сікти біотканини без глибокого опіку. Це також робить випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера досить безпечним для очей, оскільки воно не проходить крізь рогівку і кришталик ока. Звичайно, потужний спрямований промінь може пошкодити рогівку, але для захисту досить мати звичайні скляні або пластикові окуляри. Недолік

довжини світлової хвилі в 10 мкм пов'язаний з труднощами виготовлення відповідного оптичного волокна з хорошим пропусканням. Тому до сих пір найкращим рішенням цієї проблеми є дзеркальний шарнірний маніпулятор, хоча це досить дорогий оптичний пристрій, складний в юстируванні і чутливий до ударів та вібрації.

Іншим недоліком CO<sub>2</sub>-лазера є його неперервний режим роботи. У хірургії для ефективного різання необхідно швидко випаровувати біотканину без нагрівання навколишніх тканин, для чого потрібна висока пікова потужність, тобто імпульсний режим випромінювання. Сьогодні в CO<sub>2</sub>-лазерах для цих цілей застосовують так званий «супер-імпульсний» режим, при якому лазерне випромінювання має вигляд пачки коротких, але в 2-3 рази більш потужних, імпульсів у порівнянні із середньою потужністю безперервного лазера.

**Неодимовий лазер.** Це найпоширеніший тип твердотілого лазера для використання в медицині. Його активне середовище - кристал алюмоітрієвого гранату, активованого іонами неодиму Nd: YAG, - дозволяє отримати потужне випромінювання в ближньому ІЧ-діапазоні (на довжині хвилі 1,06 мкм) практично в будь-якому режимі роботи з високим ККД і можливістю волоконного виводу випромінювання. Глибина проникнення такого випромінювання в біологічні тканини дорівнює 6-8 мм і досить сильно залежить від її типу. Це означає, що для досягнення такого ж ріжучого ефекту, як у CO<sub>2</sub>-лазера, для неодимового лазера потрібно в кілька разів вища потужність випромінювання. По-друге, відбувається значне пошкодження оточуючих лазерну рану тканин, що негативно позначається на післяопераційному її загоєнні, викликаючи різні ускладнення, типові для опікової реакції (рубцювання, стеноз).

Бажана сфера хірургічного застосування неодимового лазера – об'ємна і глибока коагуляція в урології і гінекології, онкологічні пухлини, внутрішні кровотечі як у відкритих, так і в ендоскопічних операціях. Випромінювання неодимового лазера невидимо і небезпечно для очей навіть в малих дозах розсіяного випромінювання. Використання в ньому спеціального нелінійного кристалу КТР (калій-титан-фосфат) дозволяє подвоювати частоту випромінюваного світла. Одержуваний таким чином КТР-лазер,

що випромінює у видимій зеленій області спектра (на довжині хвилі 532 нм), має здатність ефективно коагулювати тканини, які насичені кров'ю і використовується в судинній і косметичній хірургії.

### **Контрольні запитання**

- 1. Коли, ким і на якому активному середовищі був розроблений перший лазер ?*
- 2. Хто і коли запустив перші лазери в СРСР та якими є три необхідні елементи цих лазерів ?*
- 3. Які відкриття в фізиці послужили основою створення лазерів?*
- 4. Коли і хто розробив перші лазери ?*
- 5. Охарактеризуйте основні проблеми, пов'язані з переходом від квантових приладів сантиметрового і дециметрового діапазону в оптичний ?*
- 6. Кому і коли була присуджена Нобелівська премія за розробку основ квантової електроніки ?*
- 7. За якими признаками поділяються лазери на типи?*
- 8. Де розроблено найбільш потужний лазер для термоядерного синтезу та яка енергія в імпульсі цього лазера ?*
- 9. Що служить основою сучасних терагерцових лазерів та якими є основні методи їх створення ?*
- 10. Які види лазерного впливу на організм людини визнаєте?*
- 11. Дайте характеристику гольмієвого,  $CO_2$  і неодимового лазерів з точки зору їх застосування в медицині.*

## ТЕМА–7. ОСНОВИ ЕКОЛОГІЇ ЛЮДИНИ

### **1. Виникнення навчальної дисципліни «Екологія людини»**

За визначенням одного з сучасних провідних екологів Ю. Одума, «Екологія - це міждисциплінарна область знання, наука про будову багаторівневих систем в природі, суспільстві, їх взаємозв'язку». Понад дві тисячі років тому великий лікар стародавності Гіппократ описав вплив клімату, води, рельєфу і пір року на здоров'я жителів різних місцевостей. В його працях також містяться докази того, що чинники зовнішнього середовища і спосіб життя роблять визначальний вплив на формування тілесних та душевних властивостей людини.

Завдяки взаємодії фахівців природних, соціальних, економічних і медико-біологічних наук почала формуватися система взаємопов'язаних понять, що визначається як екологія людини. Її становлення викликано постійно зростаючим впливом людини на природу, збільшенням числа захворювань, пов'язаних з несприятливими умовами середовища проживання, активним освоєнням територій з екстремальними умовами життя і виходом людини в космос.

Сьогодні завдання аналізу впливу різних компонентів біосфери на поведінку і стан здоров'я людини є, як ніколи, актуальною.

Таким чином, **екологія людини** - це комплексний науковий та науково-практичний напрямок досліджень взаємодії народонаселення (популяцій) з навколишнім соціальним і природним середовищем. Вона вивчає соціальні і природні закономірності взаємодії людини і людства з навколишнім космопланетарним середовищем, проблеми розвитку народонаселення, збереження його здоров'я і працездатності, вдосконалення фізичних і психічних можливостей людини.

Екологія людини повинна займатися як впливом середовища на людину, так і впливом людини на навколишнє середовище. Одне з принципових відмінностей екології людини від екології інших живих істот полягає в тому, що деяке відокремлення людини від прямого впливу середовища йде паралельно з прискоренням впровадження людини в природні процеси.

Еколог Н. Ф. Реймерс дав таке визначення: «Соціально-економічна екологія людини - це наукова область, що досліджує загальні структурно-просторові, функціональні і тимчасові закони взаємини біосфери планети і антропо системи, а також інтегральні закономірності внутрішньої біосоціальної організації людського суспільства». Тобто все зводиться до тієї ж класичної формули «організм і середовище», відмінність лише в тому, що «організмом» служить все людство в цілому, а середовищем - всі природні і соціальні процеси.

Комплексне вивчення людини як наукова дисципліна і екологія людини, по суті, одна наука. Оскільки людина – міра всіх речей, він повинен зайняти центральне місце при вирішенні найважливіших проблем життя на Землі.

У найзагальнішому вигляді можна сказати, що екологія людини – це наука, що вивчає взаємодію людини як біо-соціальної істоти зі складним багатокомпонентним навколишнім світом, який постійно ускладнюється.

## **2. Проблеми охорони здоров'я людини**

Головними завданнями вчених-екологів є створення теорії екології людини, розробка методів адаптації до різних виробничих і природно-кліматичних умов з метою отримання максимальних народногосподарських результатів при мінімальному використанні природних ресурсів.

Перерахуємо базові першорядні теоретичні проблеми, що стоять перед екологією людини:

- 1) дослідження еволюції механізмів адаптації на індивідуальному, груповому, організаційному і популяційному рівнях;
- 2) виявлення специфічних і неспецифічних реакцій на вплив середовища;
- 3) вивчення еволюційно-генетичної типології і особливостей адаптаційних механізмів - створення екологічних портретів різних груп населення;
- 4) дослідження ролі чинника часу у формуванні адекватних реакцій;
- 5) вивчення впливу космічних, земних і соціальних факторів і їх ритмів на стан здоров'я людини або на виникнення порушень його адаптаційних механізмів.

Особливо важливо виявити регіональну норму здоров'я в різних кліматично-географічних зонах: Крайній Півночі, високогір'ями, а також в екологічно неблагополучних промислових і сільськогосподарських регіонах. Для цього потрібно мати достовірні статистичні показники структури здоров'я і основних життєво важливих систем – нервово-психічної, респіраторної, серцево-судинної, а також відомості про смертність, захворюваність і тривалість життя.

В результаті забруднення довкілля збільшилася кількість серцево-судинних і психічних захворювань, соціальних проблем і травм різного походження. Порушення в генетичній інформації людини, що підривають спадкове здоров'я населення, об'єднуються під назвою «генетичного вантажу». Питання «генетичного вантажу» поки що висвітлені недостатньо. Його роль обмежується поданнями про наявність в геномі хромосомних і генних мутацій, в основному домінантних, з явним летальним результатом. Мало вивчені генетичні пошкодження, а також ті масові захворювання людей, генетичне походження яких не викликає сумнівів: атеросклероз, гіпертонія, цукровий діабет, ендокринні порушення, виразкова хвороба, дегенеративні ураження центральної і периферичної нервової системи, психічні хвороби тощо.

Для вирішення гострих питань потрібні докорінні соціально-економічні перетворення. Так, відомо, що зусилля працівників охорони здоров'я орієнтовані переважно на діагностику і лікування захворювань, тоді як здоров'я населення - це похідне численних впливів на організм людини, включаючи природно-кліматичні, виробничі, соціальні, побутові впливи, а також рівень трудової активності і творчого потенціалу. З екологічної точки зору, поняття здоров'я відображає наявність повного урівноваження пристосування організму до умов навколишнього середовища.

Сучасна медицина має справу переважно з негативними наслідками науково-технічного прогресу. Вона отримує в якості пацієнтів людей, які не змогли адаптуватися до умов навколишнього середовища. Вирішуючи з різним ступенем ефективності завдання відновлення здоров'я, медицина не може стати ланкою зворотного зв'язку в системі «людина-середовище»:

занадто велике запізнення сигналу неблагополуччя - він подається не до, а після виходу системи з ладу. Статистичні зведення констатують лише зростання захворюваності населення. Заважає і відсутність чітких критеріїв здоров'я, недостатня організаційно-методична підготовленість наших лікарняно профілактичних установ (ЛПУ), немає ефективних засобів оцінки рівнів здоров'я та визначення адаптаційних можливостей організму. Одне з рішень цієї важливої проблеми - використання методів профілактичного обстеження в розпізнаванні функціональних станів організму в зоні прикордонної між нормою і патологією, і введення класифікації таких станів на основі сучасних уявлень теорії адаптації. Застосування цих методів в практиці масових обстежень населення показало їх ефективність у визначенні рівня здоров'я не тільки окремих індивідуумів, а й груп населення, трудових колективів.

У зв'язку з вищевикладеним, для вирішення найважливіших проблем екології людини доцільно використовувати моніторинг навколишнього середовища, дослідження впливів екологічних умов на здоров'я і соціально-трудова потенціал людей.

Показники рівня здоров'я виробничих колективів значно краще характеризують трудові ресурси, ніж показники захворюваності. Тому завдання з керування трудовими ресурсами, їх заощадження і поповнення є, по суті, екологічною проблемою, оскільки її вирішення можливе лише шляхом зміни умов навколишнього середовища. При вирішенні глобальних екологічних проблем повинна застосовуватися багатовимірна система оцінки: медико-біологічна, соціальна, економічна і моральна.

### **3. Вплив природних та екологічних чинників на екологію людини**

Завдання дослідження природного середовища і ресурсів Землі за допомогою космічних апаратів досить численні і різноманітні. Дослідження Землі з космосу набувають все більш екологічного характеру. Численні пілотовані польоти довели, що при створенні необхідних умов життєдіяльності людина може жити і працювати на космічних літальних апаратах. Однак при

цьому космонавти відчувають сильний вплив чинників, пов'язаних з динамікою польоту і тривалим перебуванням в штучних умовах.

Найбільш істотно впливають на людину в польоті невагомість, космічна радіація, штучне середовище проживання, нервово-емоційне напруження, а також особливості праці та побуту. У міру накопичення досвіду медичного та медико-технічного забезпечення космічних польотів стало очевидним, що людина може пристосуватися до незвичайних умов існування, а його основні функціональні системи в змозі забезпечувати збереження достатнього рівня працездатності. Незважаючи на те, що реакції організму космонавтів відрізнялися вираженою індивідуальністю, вдалося виявити найбільш типові: вестибулярні розлади, зниження почуття спраги і апетиту, помірне зниження фізичної працездатності, стомлюваність і зміна параметрів функціонування космонавтів.

На рис.1. представлена класифікаційна схема факторів космічного польоту. Було виявлено, що зрушення у функціональній діяльності космонавтів відбувалися не тільки в польоті, але і після повернення на Землю, причому вони були тим значніше, чим довше тривав політ. Процес адаптації протікає поступово, в кілька стадій, що відрізняються переважним залученням тих чи інших функціональних систем організму і рівнем його гомеостатичної стабільності.

На рис.2. представлена схема впливу факторів космічного польоту на організм людини. Серед цих факторів провідну роль відіграє невагомість, специфічний вплив якої практично неможливо моделювати в земних умовах.

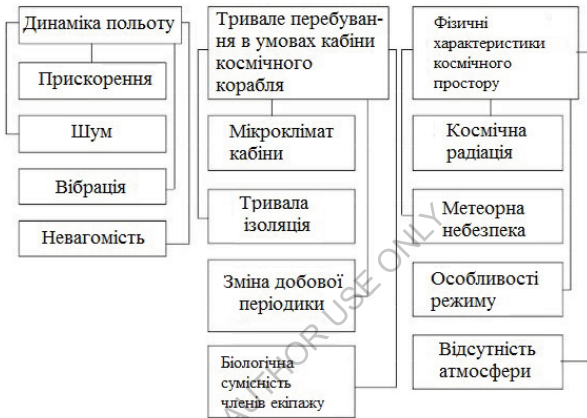
Ефекти невагомості обумовлені в основному двома причинами: зняттям гідростатичного тиску крові і зняттям гравітаційного навантаження на опорно-руховий апарат космонавта.

У комплекс виникаючих при цьому змін велике значення має зниження інтенсивності довільної рухової активності в умовах нульової гравітації.

Типовим проявом дії невагомості є ефект перерозподілу циркулюючої крові. Космонавти чітко відчувають посилений приплив крові до верхньої частини тіла, відзначають одутлість особи, гіперемія склер очей, відчуття тяжкості в голові. З



організму виводяться рідина, а потім і різні електроліти (натрій, хлор, калій тощо). Їх втрата обумовлена прагненням організму зберегти осмотичний рівновагу. Те, що відбувається в результаті цього зменшення маси від циркулюючої крові створює більш сприятливі умови для кровообігу в області грудної клітини і голови, але одночасно служить сигналом для зміни водно-сольового обміну.



**Рис.1.** Класифікаційна схема факторів космічного польоту

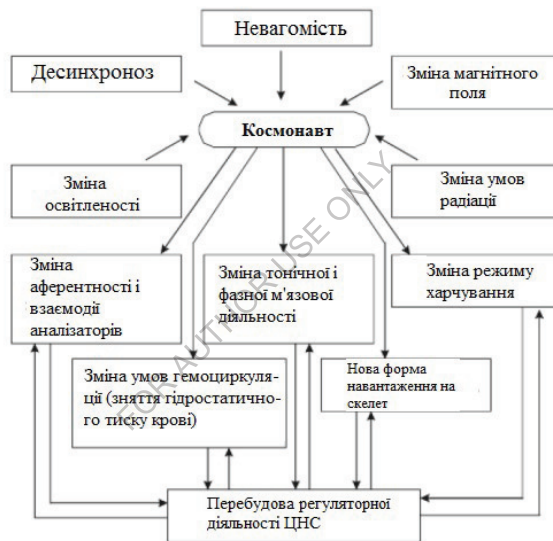
Поряд зі зменшенням фізичного навантаження зміна гемодинаміки в невагомості призводить до погіршення регуляції діяльності серця, зрушень в обміні речовин міокарда.

Відсутність ваги на борту космічного корабля створює умови зниженого навантаження на м'язовий апарат людини, в результаті чого розвивається функціональна атрофія м'язів. Найбільшою мірою це стосується так званих антигравітаційних м'язів, які відповідальні за організацію пози і в умовах дії сили земного тяжіння протидіють їй при виконанні будь-якого руху.

Зниження навантаження на м'язову систему навіть при короткотривалому перебуванні в невагомості призводить до зниження біоелектричної активності м'язів шиї, спини, стегна, а при більш тривалій невагомості - до зменшення їх обсягу,

особливо м'язів нижніх кінцівок. Ці зміни служать як би пусковим механізмом для перебудови обміну речовин у м'язовій тканині: знижується споживання кисню в результаті зменшення інтенсивності процесів енергоутворення, знижується синтез білка, швидкість включення в нього амінокислот, посилюється виведення з організму продуктів обміну, які свідчать про розпад м'язових білків.

Збільшення тривалості космічних польотів підвищує актуальність проблеми демінералізації кісткової тканини, зміни її механічних



**Рис.2.** Схема впливу факторів космічного польоту на організм людини

властивостей. Однак в даний час ще не знайдені ефективні способи впливу на обмін кальцію, що запобігають виникненню його негативного балансу в організмі під час космічного польоту. Тому втрата кальцію організмом розглядається як одна з причин обмеження тривалості польотів людини.

В умовах невагомості і при її імітації виникають різноманітні зрушення в системі крові: зміни червоних і білих формених елементів, збільшення реакції осідання еритроцитів, зміни системи згортання крові та ін. Однак найбільшу увагу фахівців привертає

феномен зменшення маси еритроцитів. Практика космічних польотів показала, що зменшення маси еритроцитів може досягати і навіть кілька перевищувати 20% в початковій фазі польоту і після його завершення.

Розробляючи проблему фізіологічної адаптації до штучного середовища існування космічних літальних апаратів і до певних природних умов, важливо не тільки застосовувати індивідуальні критерії відбору людей, а й мати схему біогеохімічного районування місця адаптації та району, звідки прибула людина. Все це дозволить встановити екопортрет кожної людини і знайти науково обґрунтовані засоби цілеспрямованого управління процесом адаптації.

При вивченні фізіологічних механізмів адаптації дуже важливо враховувати і фактор часу. По суті, біологічна картина складніше фізичної в основному за способом, яким в неї включається час.

### **Контрольні запитання**

- 1. Що вивчає навчальна дисципліна «екологія людини»?*
- 2. Які першочергові проблеми стоять перед екологією людини?*
- 3. Що необхідно знати для визначення норми здоров'я в різних кліматичних, географічних і екологічно неблагополучних промислових та сільськогосподарських регіонах нашої країни?*
- 4. Які інструменти використовуються для вирішення проблем екології людини?*
- 5. Яка система оцінки повинна застосовуватися при вирішенні глобальних екологічних проблем?*
- 6. Які фактори космічного польоту роблять свій вплив на організм космонавта?*
- 7. Які проблеми фізіологічного стану космонавтів з'являються в зв'язку зі збільшенням тривалості космічних польотів?*
- 8. Назвіть причини, що обмежують тривалість польотів людини в космос?*
- 9. Що необхідно мати на увазі при вирішенні проблеми фізіологічної адаптації космонавта до штучної середовищі існування?*

## **ТЕМА–8. ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТІВ БМІ**

На даний час аналітична техніка, що використовується в біомедичній інженерії, є основною отримання об'єктивної інформації про стан і функціонування організму людини.

Робота функціональних систем людини забезпечується складними фізичними процесами і хімічними реакціями, що протікають в живих клітинах при надходженні в організм із зовнішнього середовища їжі, води і кисню. А сам стан внутрішнього середовища людини характеризується великою кількістю медико-біологічних показників, значення яких визначаються при аналізах біологічних рідин, виділень і тканин організму.

Сучасна тенденція розвитку аналітичних досліджень в медико-біологічній практиці характеризується розширенням спектру засобів біомедичної вимірювальної техніки - за рахунок використання автоматизації засобів аналізу на базі мікропроцесорів і персональних комп'ютерів.

Зарубіжні та вітчизняні фірми і підприємства випускають велику кількість засобів біомедичної аналітичної техніки: від найпростіших вимірювальних приладів до найскладніших вимірювальних установок, що здатні автоматично виконувати різні аналітичні процедури, обробляти отриману вимірювальну інформацію за допомогою мікропроцесорів і комп'ютерів і представляти результати аналізів в найбільш наочною для сприйняття формі.

### **1. Фізико–хімічні вимірювання з використанням біомедичної аналітичної техніки та основні показники біоматеріалів**

Засоби аналітичної техніки для проведення фізико-хімічних вимірювань, складають найбільший кластер вимірювальної техніки. Вони широко застосовуються для контролю технологічних процесів в таких важливих галузях промисловості, як хімічна, нафтопереробна, нафтохімічна, газова, металургійна,

харчова та ін., в сільському господарстві, а також в системах контролю навколишнього середовища.

Особливе місце ці пристрої займають в медико-біологічних дослідженнях. Так, від 30 до 70% об'єктивної інформації про функціонування різних систем організму людини забезпечується лабораторними аналізами, при яких шляхом фізико-хімічних вимірювань визначаються значення різних медико-біологічних показників людини. Це дозволяє діагностувати різні захворювання, виявляти тенденції їх розвитку і контролювати хід оздоровчих процесів.

Оснащення медичних лабораторій новими засобами аналітичної техніки є результатом тривалого відбору вимірювальних приладів і установок, що використовуються в різних галузях науки і техніки та їх адаптації для вирішення завдань БМІ.

Сукупність засобів фізико-хімічних вимірювань, адаптованих для визначень медико-біологічних показників, і засобів вимірювання, спеціально створених для визначення цих показників, можливо об'єднати поняттям біомедична аналітична техніка.

На даний час засобами біомедичної аналітичної техніки можливо встановити кілька тисяч компонентів біологічних середовищ, які представляють інтерес для виявлення тих чи інших патологій людини.

Цим фактом визначається інтерес приладобудівних фірм і організацій до вдосконалення засобів біомедичної аналітичної техніки. Зусилля вчених та інженерів в цій області спрямовані на створення нових методів і засобів аналізу, а також вдосконалення існуючих засобів аналітичної техніки (збільшення їх швидкодії, чутливості, точності і надійності).

При медико-біологічних дослідженнях застосовуються різні біоматеріали: біологічні рідини, різні тканини організму, продукти виділень, мікроорганізми, які існують у внутрішньому середовищі організму людини, а також газу.

Для аналізів використовують по можливості мінімальну кількість біоматеріалу, яке називається **пробою**. Ця проба може перебувати в твердому, рідкому і газоподібному станах. Визначення медико-біологічних показників є складним

аналітичним завданням, що обумовлено властивостями біоматеріалу (мала концентрація проби, і її багатокомпонентність, гетерогенність тощо). З позиції фізико-хімічних досліджень виділяються наступні медико-біологічні показники: фізико-хімічні властивості, відносні показники, концентрація, рахункова концентрація і склад.

Фізична властивість середовища, яке аналізується, - це фізична величина, а хімічна властивість - це здатність даного середовища брати участь в хімічних реакціях. Ці дві властивості зазвичай об'єднуються поняттям фізико-хімічна властивість. До фізико-хімічними властивостями відносяться такі властивості, як щільність, в'язкість, коефіцієнт заломлення і ін..

На відміну від фізико-хімічної властивості умовна характеристика являє собою медико-біологічний показник, значення якого залежить від вимірювальної апаратури. Тому принципи і засоби вимірювань відносних показників зазвичай стандартизуються. До таких умовним характеристик відносяться швидкість осідання еритроцитів, характеристики згортання крові тощо.

Оскільки біоматеріали – це переважно різні суміші, то їх поділяють на *бінарні, багатокомпонентні і псевдобінарні*. *Бінарна суміш* - це суміш, що складається з двох компонентів. *Багатокомпонентна суміш* – це суміш, що складається з трьох або більше компонентів. *Псевдобінарна суміш* -це багатокомпонентна суміш, яка при певних умовах за окремим фізико-хімічним властивості може розглядатися як бінарна. Компоненти, що становлять суміш, підрозділяються на такі, які визначаються і які є невизначеними. *Обумовлений компонент* - це компонент суміші, що підлягає кількісному визначенню. *Невизначений компонент* – це компонент суміші, який не підлягає кількісному визначенню.

Концентрацію компонентів в сумішах в залежності від зручності і вимог задачі визначають в різних одиницях. У загальному випадку використовують масову  $C_m$  і об'ємну  $C$  концентрації, які визначаються відповідно як відношення маси або обсягу даного (і-го) компонента до маси або обсягу всієї суміші. Концентрацію виражають в частках або відсотках (відповідно, у відсотках масових (% мас.) і відсотках об'ємних (% об'єм.)). Зв'язок між перерахованими концентраціями описується виразом:

$$C_{mi} = C_i \frac{\rho_i}{\rho}, \quad (1)$$

де  $C_{mi}$  і  $C_i$  - масова і об'ємна концентрації  $i$ -го компонента;  $\rho_i$  і  $\rho$  - густина  $i$ -го компонента і аналізованої середовища. Масову

концентрацію вимірюють також в одиницях  $\left[ \frac{\text{од.маси}}{\text{од.об'єму}} \right]$ ,

наприклад,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\text{мг/м}^3$  і т. д.

Для вираження малих об'ємних концентрацій на рівні тисячних, мільйонних або мільярдних часток, використовують відповідно позначення  $\text{pm}$ ,  $\text{ppm}$  і  $\text{ppb}$ :  $\text{pm}$  (лат. Pro mille - на тисячу),  $\text{ppm}$  (англ. Parts per million - частина на мільйон),  $\text{ppb}$  (англ. parts per billion - частина на мільярд):

$$1 \text{ pm} = 10^3 = 10^{-10}\% \text{ об.}; \quad (2)$$

$$1 \text{ ppm} = 10^6 = 10^{-40}\% \text{ об.}; \quad (3)$$

$$1 \text{ ppb} = 10^9 = 10^{-70}\% \text{ об.} \quad (4).$$

Для розчинів часто вживають такі вирази вмісту розчиненого речовини.

*Молярна концентрація* являє собою відношення кількості речовини до об'єму розчину. При цьому розчин, що містить в 1 л 1 моль розчиненої речовини  $\left[ \frac{\text{моль}}{\text{л}} \right]$ , Називають молярним (М) або *моляльна концентрація* являє собою відношення кількості розчиненої речовини до маси розчинника  $\left[ \frac{\text{моль}}{\text{кг}} \right]$ . При цьому, розчин, що містить в 1 кг 1 моль розчиненої речовини, називають моляльним (m).

*Еквівалентна концентрація* являє собою відношення числа еквівалентів розчиненої речовини до об'єму розчину. При цьому, розчин, який містить в 1 л 1 г-екв розчиненої речовини, називають нормальним (н).

## 2. Класифікація методів аналізу і засобів аналітичної техніки

В основі медико-біологічних аналітичних досліджень лежить хімічний аналіз. Тобто, сукупність операцій, метою яких є визначення, з яких молекул, атомів, іонів, клітин складається

проба аналізованого середовища (якісний аналіз, ідентифікація), або визначення концентрації цих компонентів (кількісний аналіз). На даний час поняття хімічного аналізу використовується в більш широкому сенсі, а саме хімічний аналіз включає також визначення фізико-хімічних властивостей і відносних показників аналізованого середовища.

Для реалізації хімічного аналізу використовують різні методи аналізу. Поняття метод аналізу можна визначити як сукупність хімічних або фізичних впливів на пробу аналізованого середовища і вимірювань величини (або величин), які визначають результати цих впливів. В окремих випадках метод аналізу може передбачати тільки вимірювання фізичної величини.

З позиції фізико-хімічних вимірювань всі методи хімічного аналізу можна розділити на дві групи: фізичні та фізико-хімічні.

Фізичні методи аналізу засновані на вимірюванні фізичних величин, властивих аналізованому середовищу, наприклад, щільності, в'язкості, коефіцієнта заломлення, оптичної щільності.

Фізико-хімічні методи аналізу засновані на хімічних перетвореннях аналізованого середовища і вимірюванні фізичних величин, що характеризують ефекти, якими супроводжуються ці перетворення, наприклад, забарвлення розчину, об'єму осаду, обсягу аналізованого середовища.

У свою чергу, фізико-хімічні методи аналізу можна розділити на хімічні і біохімічні.

У перших для хімічних перетворень використовуються різні хімічні реагенти, а в других - матеріали біологічної природи.

Залежно від попереднього впливу на аналізоване середовище розрізняють: методи аналізу без попереднього перетворення аналізованої середовища і методи аналізу з попереднім перетворенням аналізованого середовища. При реалізації останніх використовуються фізичні та хімічні методи перетворення аналізованого середовища. Фізичними називають перетворення, при яких змінюються фізичні властивості або стан аналізованого середовища, а склад залишається незмінним (наприклад, зміна агрегатного стану середовища, розбавлення цього середовища). Хімічними називають перетворення, при яких змінюється склад аналізованого середовища.



Методи аналізу складу аналізованих середовищ поділяють на селективні та інтегральні.

*Селективними* називають методи аналізу складу, що базуються на використанні фізичного явища або хімічної реакції, які вибірково (однозначно) залежать від концентрації в суміші аналізованого компонента або групи компонентів одного класу.

*Інтегральними (невибірковими)* називають методи аналізу складу, що базуються на відмінності фізико-хімічних властивостей компонентів аналізованого середовища.

Сучасний аналіз медико-біологічних показників людини і контроль біотехнологічних процесів багато в чому базуються на використанні спеціальних технічних засобів, які називаються аналізаторами.

*Аналізатор*- вимірювальний прилад, вимірювальна установка або вимірювальна система, призначені для визначення складу або властивостей аналізованих середовищ.

*Автоматичний аналізатор* - аналізатор, в якому всі операції здійснюються автоматично.

*Напіваавтоматичний аналізатор* - аналізатор, в якому автоматично здійснюється більша частина операцій.

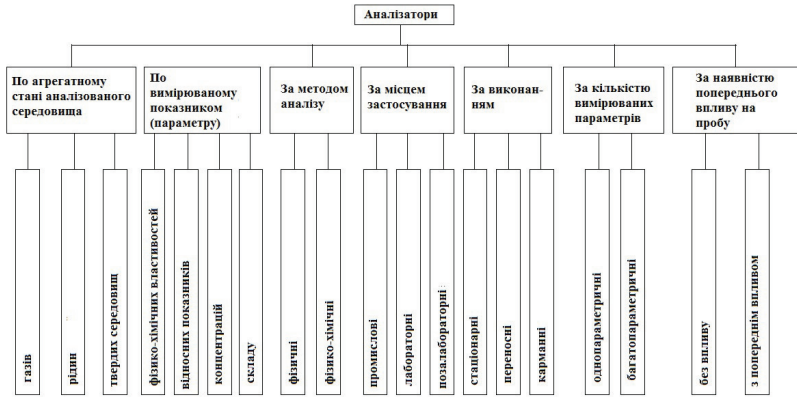
*Індикатор* (визначник) – це аналізатор, що виробляє інформацію про якісний склад аналізованого середовища (наприклад, про наявність чи відсутність будь-якого компонента).

Для класифікації сучасних аналізаторів використовується ряд класифікаційних ознак. Найбільш важливі з цих ознак представлені в класифікації, наведеної на рис.1.

Крім того, аналізатори класифікуються за принципом дії, тобто по явищу (сукупності явищ), яке використовується для одержання вимірювальної інформації.

### **3. Структурні схеми біомедичних аналізуючих пристроїв**

На даний час відсутня загальноприйнята термінологія для біомедичної аналітичної техніки. У той же час «аналізатор» являє собою засіб вимірювань. Цим обумовлена доцільність використання при розгляді структурних схем біомедичних аналізаторів термінів і визначень, які відповідають рекомендаціям з міждержавної стандартизації в галузі метрології та вимірювальної техніки.



**Рис.1.** Класифікація аналізаторів.

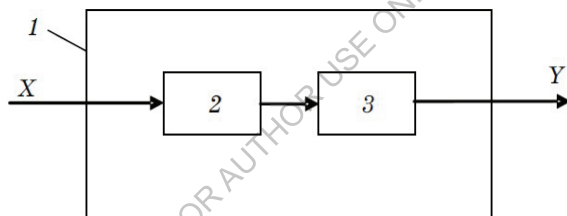
На рис.2 наведена структурна схема основного вимірювального пристрою всіх аналізаторів - датчика фізико-хімічних властивостей або концентрації. Він містить первинний вимірювальний перетворювач, чутливий елемент, який знаходиться в контактi з аналізованим середовищем і сприймає вплив вимірюваної величини  $X$  цього середовища. Цей перетворювач перетворює вимірювану величину в деяку іншу величину (вимірювальний сигнал), яка сприймається проміжним (передавальним) вимірювальним перетворювачем, а цей перетворювач, в свою чергу, перетворює сигнал первинного вимірювального перетворювача в вимірювальний сигнал  $Y$ , зручний для обробки, зберігання, подальшого перетворення, індикації і передачі.

У зарубіжній літературі давач фізико-хімічної властивості або концентрації, первинний вимірювальний перетворювач і проміжний вимірювальний перетворювач зазвичай називають відповідно сенсорним пристроєм, сенсором (розпізнає елементом) і трансд'юсером (англ. Transducer - перетворювач, передавач). У деяких давачах фізико-хімічних властивостей або концентрації вимірювальний сигнал  $Y$  може вироблятися безпосередньо первинним вимірювальним перетворювачем.

На рис.3. представлені структурні схеми різних аналітичних вимірювальних приладів. Загальним для даних приладів є

наявність в їх складі первинного та проміжного вимірювальних перетворювачів і пристрою обробки і відображення інформації, який представляє результати вимірів  $Z$  в формі, зручній для сприйняття людини.

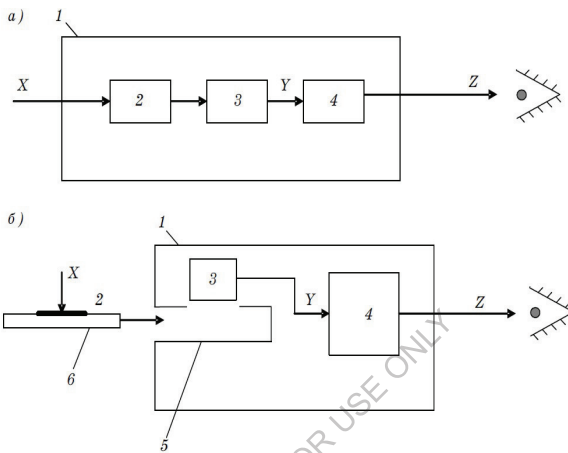
У приладі (рис.3, а) рідке середовище, яке аналізується, подається до чутливого елемента первинного вимірювального перетворювача у вигляді проби, а газоподібне середовище аналізується, як правило, - в вигляді потоку газу. Робота первинного і проміжного вимірювальних перетворювачів, що входять до складу вимірювальних приладів, нічим не відрізняється від їх роботи, яка описаної вище, а вихідний сигнал  $Y$  надходить в пристрій обробки і відображення інформації, яка зазвичай включає аналого-цифровий перетворювач, мікропроцесор і цифровий відліковий пристрій.



**Рис.2.** Структурна схема давача фізико-хімічної властивості або концентрації (аналітичного давача): 1 - аналітичний давач (сенсорний пристрій); 2 - первинний вимірювальний перетворювач (сенсор); 3 - проміжний вимірювальний перетворювач.

Структурна схема вимірювального приладу (рис.3) характерна для переносних аналізаторів. Тут пробу аналізованого рідинного середовища наносять на спеціальну пористу смужку, яка містить в сухому вигляді реагент, здатний вступати в селективну хімічну реакцію з визначальним компонентом аналізованого середовища. Тобто, ця смужка є первинним вимірювальним перетворювачем. Після завершення реакції забарвлення смужки змінюється. Смужка вводиться в приймальний відсік приладу, де за допомогою проміжного

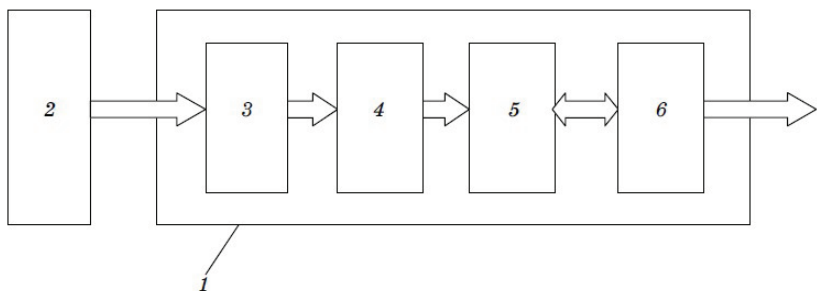
вимірювального перетворювача, вимірюється ступінь зміни забарвлення смужки і виробляється сигнал  $Y$ , що передає інформацію про значення вимірюваного параметра, який надходить в пристрій обробки і відображення інформації.



**Рис.3.** Структурні схеми аналітичних вимірювальних приладів:  
 1 - аналітичний вимірювальний прилад, 2 - первинний вимірювальний перетворювач, 3 - проміжний вимірювальний перетворювач, 4 - пристрій обробки і відображення інформації, 5 – приймальний відсік приладу, 6 - пориста смужка з реакційним шаром.

Аналітичні вимірювальні установки являють собою розташовану в одному місці сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювань та допоміжних пристроїв, які забезпечує отримання вимірювальної інформації про декілька вимірюваних величинах одного або декількох аналізованих середовищ, тобто, вони є багатопараметричними аналізаторами.

Узагальнена структурна схема аналітичної вимірювальної установки показана на рис.4. У вимірювальних установках з накопичувача аналізованих середовищ (зразків) за допомогою автоматичного пристрою відбору та введення проб, останні направляються в пристрій попереднього впливу, в якому здійснюються хімічні або фізичні дії на ці проби.



**Рис.4.** Структурна схема аналітичної вимірювальної установки:

1 - аналітичне пристрій вимірювальної установки; 2 - накопичувач зразків аналізованих середовищ; 3 - автоматичний пристрій відбору та введення проб аналізованих середовищ; 4 - пристрій попереднього впливу на пробу; 5 - блок первинних вимірювальних перетворювачів; 6 - блок обробки і відображення інформації.

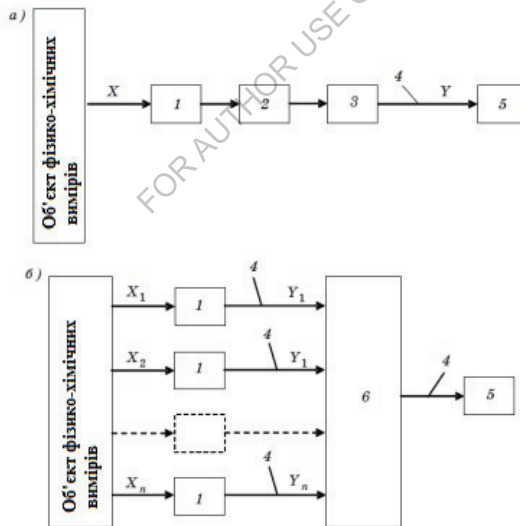
Ці дії або забезпечують саму можливість отримання вимірювальної інформації, або оптимізують умови вимірювань. Субстанції, які одержуються після впливу на проби аналізованого середовища (середовищ), надходять у блок первинних вимірювальних перетворювачів, в якому вимірюються фізичні або фізико-хімічні властивості чи концентрації компонентів даних субстанцій. Сигнали з блоку первинних вимірювальних перетворювачів надсилаються в пристрій обробки і відображення інформації, в якому за результатами обробки сигналів формується інформація про вимірювальні медико-біологічні показники аналізованого середовища. Пристрій обробки і відображення інформації є або спеціалізованим мікропроцесорним пристроєм, або персональним комп'ютером, що підтримує аналого-цифровим перетворювачем.

Аналітичні вимірювальні системи являють собою сукупність засобів вимірювальної техніки, комп'ютерів і допоміжних пристроїв, які розміщені в різних точках відносно об'єкта вимірювань, що призначена для отримання інформації про одну або кількох вимірюваних величин одного чи декількох аналізованих середовищ і вироблення вимірювальних сигналів в різних цілях.

На рис.5.,а показана структурна схема найпростішої аналітичної вимірювальної системи. Ця система включає до свого складу датчик, що знаходиться в контактi з об'єктом вимірювань, і приймач інформації, який розташовується у видаленні від об'єкта вимірювань. Перераховані вимірювальні пристрої з'єднані між собою відповідними каналами зв'язку. Таким чином, характерною рисою вимірювальних систем є те, що датчик і приймач інформації просторово розділені.

Конструкція каналів зв'язку може бути досить різноманітною: від найпростішої, наприклад у вигляді двох провідників, до складної апаратури радіоканалу, що містить радіопередавач і радіоприймач.

Залежно від типу вимірюваної величини, принципу дії датчика, відстані, на яку потрібно передати інформацію. До складу вимірювальної системи можуть бути додатково включені проміжний і вимірювальні перетворювачі.



**Рис.5.** Структурні схеми аналітичних вимірювальних систем:

1 - датчик; 2 - проміжний вимірювальний перетворювач; 3 - вимірювальний перетворювач; 4 - канал зв'язку; 5 - приймач інформації; 6 - комутатор.

Приймач інформації – це спеціалізоване мікропроцесорний пристрій або комп'ютер, які забезпечують представлення результатів вимірювань в формі, зручній для сприйняття людиною.

На рис.5.6 показана структурна схема аналітичної вимірювальної системи, яка на відміну від системи (рис. 5.а) дозволяє отримувати вимірювальну інформацію про декілька вимірюваних величинах.

У цій системі датчики окремих вимірюваних величин  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , по черзі за допомогою комутатора підключаються до приймача інформації. У наведеній на рис.5.6 системі показані для простоти тільки датчики. У загальному випадку в неї можуть включатися проміжні і вимірювальні перетворювачі. Сигнали  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$ , які надходять з каналів зв'язку в комутатор, повинні бути однакові за своєю природою і діапазону вимірювань. Це необхідно для їх сприйняття одним і тим же приймачем інформації.

Аналітичні вимірювальні системи використовуються для визначення медико-біологічних показників при розміщенні біологічних об'єктів на літаках, в космічних кораблях, барокамерах тощо, а також при постійному контролі й управлінні технологічними апаратами в біохімічній і фармацевтичній промисловості.

#### **4. Фізичні основи роботи фотоабсорбційних аналізаторів**

Робота всіх оптичних аналізаторів базується на вимірюванні потоків електромагнітних випромінювання.

Електромагнітні випромінювання (хвилі) являють собою змінне електромагнітне поле, яке розповсюджується в просторі з кінцевою швидкістю. Основними характеристиками електромагнітного випромінювання є частота  $f$  і довжина хвилі  $\lambda$ , пов'язані між собою співвідношенням

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (5)$$

де  $c$  – швидкість поширення електромагнітного випромінювання (в вакуумі  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с).

Властивості електромагнітного випромінювання сильно розрізняються залежно від довжини хвилі. Для отримання вимірювальної інформації в лабораторних медико-біологічних дослідженнях надзвичайно важливе значення мають випромінювання оптичного діапазону, до якого прийнято відносити невидиме ультрафіолетове (УФ), інфрачервоне (ІЧ) і видиме (ВД) випромінювання. Об'єднання УФ-, ІЧ-і ВД-випромінювання в загальний оптичний діапазон визначається спільністю методів їх одержання і вимірювання. Тому оптичним аналізатором називають спектральний аналізатор, який використовує для аналізу випромінювання оптичної області спектру.

Оптичні методи аналізу в даний час є найбільш великою групою аналітичних методів, що широко використовуються в медико-біологічних дослідженнях. В основі цих методів лежать фізичні явища, такі як поглинання, розсіювання, відбивання, поляризація і заломлення потоків електромагнітного випромінювання. При цьому, використовується монохроматичні, поліхроматичні, немонохроматичні і когерентні електромагнітні випромінювання. В оптичному аналізі електромагнітні випромінювання прийнято характеризувати енергетичними чи фотометричними величинами, такими як потік випромінювання  $\Phi$ , сила випромінювання (інтенсивність потоку)  $I$ , енергія випромінювання  $Q$  тощо.

Оптичні методи аналізу на даний час реалізуються різноманітними високочутливими і точними автоматичними і напівавтоматичними аналізаторами найважливіших медико-біологічних показників.

Принцип дії фотоабсорбційних (лат. Absorption - поглинання) аналізаторів заснований на явищі поглинання гомогенним середовищем, що аналізується, електромагнітного випромінювання (світла), яке залежить від концентрації обумовленого компонента в цьому середовищі. Аналізатори, які використовують даний принцип дії, прийнято розділяти на фотометри, фотоколориметри (фотометри для забарвлених середовищ) і спектрофотометри.

Відомо, що потік електромагнітного монохроматичного випромінювання  $\Phi_0$  з довжиною хвилі  $X$  при проходженні через



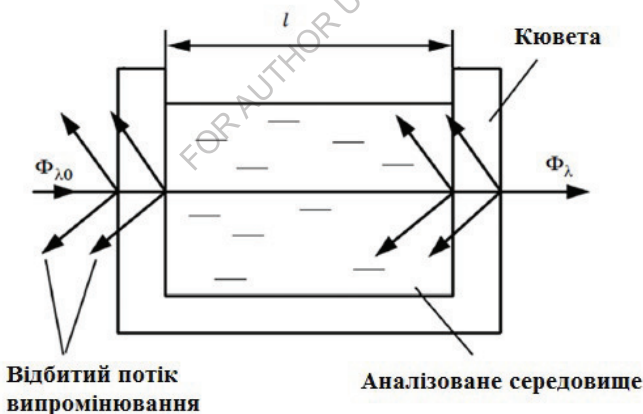
прозорий скляний або пластмасовий посуд, який називають кюветою, що заповнена гомогенним середовищем, послаблюється до значення  $\Phi$ . Причому це ослаблення пов'язано як з поглинанням цього потоку аналізованої середовищем, так і з потоком відбитим від стінок посудини (рис.6.).

Ослаблення потоку випромінювання без урахування відбивання в разі, якщо стінки кювети паралельні один одному, а потік спрямований перпендикулярно до поверхні стінок, описується законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-k}, \quad (6)$$

$$\Phi = \Phi_0 10^{-al}, \quad (7)$$

$k = 2,3026 a$ , де  $a$  і  $k$  - показник і натуральний показник поглинання;  $l$  - товщина поглинаючого шару аналізованого середовища.



**Рис.6.** Схема поширення потоку електромагнітного випромінювання в кюветі.

Вирази (6) і (7) з урахуванням відбивання світла від стінок кювети можна записати у вигляді:

$$\Phi = A\Phi_0 e^{-kl}; \quad \Phi = A\Phi_0 I 0^{-al}, \quad (7)$$

де  $A$  – коректуючий коефіцієнт, що враховує відбивання електромагнітного випромінювання від стінок кювети, який приблизно рівний 0,9. Зазвичай при аналізі роботи фотоабсорбційних аналізаторів використовується вираз (7). Для випадку, коли обрана довжина хвилі, на якій має місце вибіркове поглинання випромінювання, є визначальним компонентом аналізованого середовища, цей вираз записується у вигляді

$$\Phi = \Phi_0 I 0^{-kC}, \quad (8)$$

де:  $a = kC$ ,  $k$ - постійна, що залежить від природи компонента, який визначається, і довжини хвилі  $\lambda$  випромінювання;  $C$  - концентрація що компонента в аналізованій середовищі.

При аналізі рідинних середовищ, коли концентрація  $C$  виражається молярною концентрацією, вираз (8) записується у вигляді:

$$\Phi = \Phi_0 I 0^{-\varepsilon C_M l}, \quad (9)$$

де  $\varepsilon$  – молярний показник поглинання.

Вираз (9) можна перетворити до вигляду

$$\lg \Phi_0 / \Phi = \varepsilon C_M l = D. \quad (10)$$

Величину  $D$ , виражену логарифмом відношення  $\lg \Phi_0 / \Phi$ , називають оптичною густиною поглинаючої речовини (визначається компонента). Як це впливає з виразу (10), оптична щільність при інших постійних умовах пропорційна концентрації що визначається компонента, який аналізується.

Як впливає з виразу (10), оптична щільність є логарифмічною величиною. В метрології прийнято в якості одиниці логарифмічних величин використовувати бел (Б), який визначається відношенням  $1 \text{ Б} = \lg(P_2/P_1)$  при  $P_2 = 10P_1$  (де  $P_1$  і  $P_2$  - однойменні енергетичні величини: щільність енергії, потужність, енергія тощо).

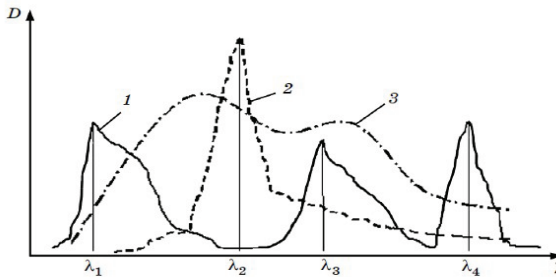
Крім оптичної густини при аналізі роботи фотоабсорбційних аналізаторів використовується величина, яка називається коефіцієнтом пропускання  $T$  і визначається відношенням минулого потоку випромінювання до падаючого потоку випромінювання:

$$T = \Phi/\Phi_0 = 10^{-\varepsilon C l} \quad (11)$$

З виразів (10) і (11) випливає, що оптична щільність і коефіцієнт пропускання пов'язані виразом:

$$D = \lg(1/T). \quad (12)$$

Можливість застосування фотоабсорбційного аналізатора для вимірювання концентрації того чи іншого компонента визначається попередніми дослідженнями спектру поглинання цього компонента, який представляє собою залежність оптичної щільності від довжини хвилі електромагнітного випромінювання. Наприклад, на рис.7. на довжинах хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  спостерігається вибіркове поглинання випромінювання компонентами 1 і 2, а на довжинах хвиль  $\lambda_3$  і  $\lambda_4$  спектри поглинання цих компонентів перекриваються, що виключає можливість виборчого вимірювання концентрації компонентів 1 і 2 на довжинах хвиль  $\lambda_3$  і  $\lambda_4$ . Таким чином, якщо аналізована середовище містить компоненти 1 і 2, то на довжинах хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  можливе вибіркоче вимірювання концентрації цих компонентів.



**Рис.7.** Спектри поглинання електромагнітного випромінювання трьох компонентів середовища, що аналізується.

### **Контрольні запитання**

- 1. Які біоматеріали використовують при медико-біологічних дослідженнях ?*
- 2. Що розуміють під масовою і об'ємною концентраціями компонента середовища, що аналізується ?*
- 3. Охарактеризуйте фізичні і фізико-хімічні методи аналізу при медико-біологічних дослідженнях.*
- 4. Дайте сучасну класифікацію аналізаторів медико-біологічних показників людини.*
- 5. Охарактеризуйте структурні схеми давача, вимірювального приладу переносного аналізатора і аналітичної вимірювальної установки.*
- 6. Які структурні схеми аналітичних вимірювальних систем застосовують в БМІ ?*
- 7. В чому полягає сутність роботи фотоабсорбційних аналізаторів і яка їх принципова схема ?*

## **ТЕМА–9. ОСНОВИ РОЗРОБОК І ЗАСТОСУВАННЯ ЛІКУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ**

Технологічна модернізація галузі охорони здоров'я виявляє себе в цілому як світова тенденція. Вчені і розроблювачі повинні створювати нові рішення для підвищення доступності, комфортності та ефективності медичних послуг, а уряди – реалізовувати відповідні програми щодо модернізації.

Всю медичну техніку з точки зору вирішуваних задач можна розподілити на три великі групи:

- апаратуру;
- інструменти;
- обладнання.

Медичні апарати являють собою технічні пристрої, які забезпечують автоматизований процес взаємодії з пацієнтом. Медичний інструмент впливає на пацієнта в повній мірі обслуговування лікарем і відіграє пасивну роль. Медичне обладнання виконує допоміжну другорядну функцію обслуговування пацієнта і лікаря.

Медичні апарати можуть базуватися на різній фізичній природі (електронні, гідравлічні, пневматичні тощо). Але в теперішній час інформативні показники фізіологічного стану організму людини в основному представляються електричними сигналами. Це пов'язано з тим, що дані, подані електричним сигналом, зручно перетворювати на цифровий двійковий код, автоматично реєструвати і передавати на відстань, а також оброблювати математичними методами і алгоритмами, довго зберігати в комп'ютерних системах. Це саме стосується і зворотних процедур, коли потрібно забезпечувати необхідний цілеспрямований енергетичний вплив на пацієнта. Тому, для здійснення вказаних задач в медичній практиці застосовуються різні електронні засоби, які умовно можна розподілити за групами захворювань чи за областями медицини. Враховуючи їх поширеність та інженерну специфіку розв'язання задач буде розглядатися лише медична електронна апаратура.

Неможливо визначити галузь науки і техніки, в тому числі і медицини, в якій не використовувалась би електронна апаратура. В

медицині це стосується профілактики, лікування і проведення експериментів. Інструментальні методи знайшли розповсюдження для клінічних і амбулаторних умов, курортно-санаторної практики і центрів реабілітації, в оздоровчо-відновлювальних і спортивних центрах. Без спеціального методичного і технічного забезпечення неможливі космічні та підводні дослідження, ергономічна та інженерно-психологічна експертиза автоматизованих комплексів, пов'язана із визначенням поточного стану здоров'я людини і напруженістю її праці. При цьому контролюється рівень працездатності і втоми, режими роботи і відпочинку тощо. Це дозволяє оптимізувати конкретні ергономічні показники, підвищити продуктивність праці зі збереженням не лише високої працездатності, але й стану здоров'я людини.

У практиці світової медицини відомий період, коли взагалі не використовувались технічні прилади діагностики і обстеження хворих. Лікар обґрунтовував діагноз виходячи з результатів опитування хворого, підрахунку пульсу, огляду шкіри, очей та язика пацієнта. Температуру тіла емпірично визначали рукою до другої половини XIX сторіччя.

На розвиток діагностичної медицини великий вплив зробили винаходи ртутного термометра (1714 р.) та стетоскопа (1816 р.). З XIX сторіччя розпочинається відрахунок основних наукових досягнень в галузі електрики і магнетизму, які почали застосовуватися в медичній практиці, навіть раніше, ніж в інших областях життєдіяльності людини. Так було з відкриттям в 1895 році Рентгеном (W.C. Rentgen) ікс-випромінювання (X-ray) під час експериментів з першою електровакуумною трубкою Крукса. Вже в 1896 році розпочинається використання рентгенографії в медицині.

Перший електрокардіограф, сконструйований Ейнтховеном (W. Einthoven) в 1901 році, був вимірювальним приладом групи мілівольметрів. Він важив близько 270 кг і вимагав для обслуговування декількох людей. Як електроди використовувались скляні сосуди із розчином хлористого натрію, куди опускались кінцівки пацієнта.

В XX сторіччі продовжилось впровадження до діагностичної та терапевтичної медичної практики новітніх досягнень електронної техніки. Безперечно, що в цьому велику роль

відіграли розвиток напівпровідникової мікроелектроніки і поява комп'ютерних технологій.

Серед багатьох задач медичного обслуговування населення перше місце займають контроль за станом здоров'я людини і діагностування патологічних змін з метою своєчасного виявлення наявності інфекцій, генетичної або набутої схильності до захворювань, прогнозування протікання хвороб і реабілітації людини під час одужування. Для цього розроблена велика кількість різноманітних методик із застосуванням необхідного обладнання, обґрунтовано рекомендації щодо його використання і забезпечення витратними матеріалами, що дозволяє ефективно вирішувати поставлені задачі. Разом з тим, постійне оновлення технологій виробництва електронної техніки та її елементної бази, а також методик діагностування вимагає розроблення нових медичних пристроїв та систем. Особливо актуальною ця проблема стала на сьогоднішній день.

Це пов'язано з ідеологією підготовки фахівців. До певного часу інженери, які вирішували конкретні задачі, розподілялися на тих, хто займався суто програмуванням, і тих, хто розроблював лише апаратуру. З появою мікропроцесорів цей певний антагонізм поступово розмився. Неможливо розроблювати і налаштовувати апаратну частину, не знаючи основ програмування. Так само неможливо писати програмне забезпечення, не знаючи принципів роботи апаратури. Приблизно така сама ситуація склалася в галузі медичної електроніки. Інженери, які займаються розробленням медичної електронної апаратури добре володіють методиками її проектування і налаштування, розуміють специфіку розроблення засобів з урахуванням медичного застосування. Але, при цьому, вони повинні чітко розуміти конкретні вимоги медиків, для чого потрібні певні знання у протіканні біологічних, біофізичних та біохімічних процесів. Так само, медичний персонал, який працює з медичною електронною апаратурою, повинен розуміти технічні принципи її роботи. Інакше це може призвести до суттєвих негативних наслідків. Особливо це стосується проведення експериментальних досліджень, оскільки помилково отримані результати можуть викликати непередбачувані наслідки.

Робота на стику медицини та електроніки, а в більш

широкому сенсі – техніки в цілому, вимагає поширення інформації для вивчення принципів роботи апаратури і методик її проектування. Проблема створення сучасного електронного пристрою чи системи має багатоплановий характер, кожний з аспектів якого може суттєво впливати на технічні характеристики і конструктивні рішення, реалізовані розроблювачем. Це пов'язано з біологічним обґрунтуванням вибору метода, його реалізацією (як в загальному, так і в схемотехнічному сенсі), оброблюванням отриманих результатів, інженерно-технічним про-робленням конструктивного та ергономічного оформлення пристрою як в цілому, так і його складових частин.

Разом з тим, література, призначена для інженерів, містить теоретичні відомості в галузі біофізики та біохімії, метрології тощо. Та, що призначена для медичних працівників обмежується відомостями щодо класифікації медичної апаратури і правил її безпечної експлуатації або окремих методів досліджень лише з рекламними фотографіями пристроїв, що виставляються на продаж.

Можна сформулювати основні проблеми, що виникають під час проектування електронних медичних пристроїв, з яких випливають і відповідні задачі:

- термінологічна. Згідно вимог метрології, в назві вимірювального приладу повинна бути вказана фізична величина чи її одиниця (амперметр, вольтметр, частотомір тощо). Назви медичних приладів не відповідають цьому принципу (електрокардіограф, електроенцефалограф, реограф, томограф тощо). В першу чергу це стосується пристроїв із реєстрацією значень;

- шкали створюваних медичних пристроїв повинні градуюватися в одиницях фізичних величин, значення є кінцевою медичною вимірювальною інформацією відповідно до рівняння перетворення. Але, враховуючи різноманітність і специфіку приладів контролю біофізичних та біохімічних процесів, які відбуваються в організмі, а також їх складність, рівняння перетворення в явному вигляді скласти не завжди можливо;

- всі медичні пристрої повинні здійснювати мінімальний вплив на досліджуваний процес і сам об'єкт дослідження



(людину) не лише для того, щоб зберегти чистоту експерименту, а, в першу чергу, для уникнення шкоди здоров'ю;

□ під час експлуатації приладу буде виникати багато факторів впливу (час вимірювання, кількість отриманої інформації, її обсяг і т.і.), до яких приєднуються додаткові в умовах телемедицини (час передавання в режимі реального часу, вірогідність переданих даних тощо). Важливими також є економічні показники (вартість пристрою, термін окупності і т.д.). Всі вони мають бути пов'язані між собою і оптимізовані в комплексі. При цьому цільова функція оптимізації виявляється дуже складною, а її спрощення і розв'язання додатково вимагає залучення математичного апарату теорії багатофакторного експерименту, моделювання та інших;

□ при розроблюванні метрологічного забезпечення розроблюваного пристрою потрібно не лише скласти баланс похибок з урахуванням подання результатів для досягнення необхідної точності з метою отримання вірогідних висновків діагностування, але й чітко будувати методіку метрологічної атестації;

□ багато медичних пристроїв формують вихідну інформацію для графічних пристроїв у вигляді кардіограми, енцефалограми, рентгенограми тощо. При цьому необхідно враховувати не лише похибку виведення інформації графічним пристроєм, але й можливість автоматизованого оброблювання, архівації, зберігання і передавання вихідних даних;

□ при конструюванні діагностичних пристроїв прямого чи непрямого енергетичного впливу необхідно його зводити до обґрунтованого мінімуму, щоб виключити побічні негативні для організму ефекти. Для цього доцільно оцінювати як чутливість самого організму, так і чутливість метода в цілому;

□ велику увагу треба приділяти як вибору датчиків і сенсорів, так і їх розташуванню. З одного боку необхідно забезпечити їх ефективну роботу, а з другого мінімізувати їх вплив на фізичні і психофізіологічні показники обстежуваного пацієнта;

□ в умовах великого рівня промислових завод необхідно передбачити методичні та схемотехнічні заходи для якщо не повного вилучення, то хоча б забезпечення мінімізації їх негативного впливу.

Абсолютно не підлягають обговоренню питання санітарно-гігієнічної та технічної безпеки, надійності, ергономіки та інші, які регламентуються як нормативними документами, так і вимогами фахівців-медиків.

Зрозуміло, що наведені проблеми і задачі, які з них випливають, не можуть бути розв'язані тривіальними методами. Потрібні адаптивні пристрої з елементами штучного інтелекту, а це, в свою чергу, вимагає використання процесорів різної продуктивності для вирішення конкретних завдань.

Питання класифікації за різними ознаками розглядаються практично в усій літературі, присвяченій медичній електронній апаратурі, але вони не враховують певних аспектів. Пропонується класифікація, наведена на рис. 1.

Контрольно-діагностична апаратура призначена для реєстрації і оброблювання інформації, яка віддзеркалює процеси, що відбуваються в організмі людини чи в навколишньому середовищі, за умови, коли вони безпосередньо впливають на організм людини. З урахуванням розвитку телемедицини може розглядатися ще й функція передавання інформації в режимі реального часу. В літературі [8] до цього пункту вводять ще діагностику процесів, які відбуваються в конструкціях медичного призначення, але це зводиться до вирішення суто інженерних задач і до медицини має опосередковане відношення.

Формально апаратуру контролю процесів і визначення конкретних показників функцій в організмі людини відповідно до класичної вимірювальної техніки можна розподілити на дві великі групи:

- засоби вимірювання та реєстрації електричних величин;
- засоби електричного вимірювання та реєстрації неелектричних величин.

Перші базуються на реєстрації біопотенціалів, що виникають під час роботи різних органів. Серед найбільш поширених можна назвати електрокардіографи, електроенцефалографи, електроміографи. Перші два типи приладів докладно описані в літературі.



**Рис.1.** Класифікація засобів медичної електронної апаратури

### Контрольні запитання

1. Що таке медичні апарати?
2. Для чого знайшли розповсюдження інструментальні методи?

## **ТЕМА–10. ВСТУП У БІОМЕТРІЮ**

Еволюція людей досягла стадії інформаційного суспільства, основним ресурсом якого є не просто корисні копалини, але й інформація. Майже кожен має доступ до інформації як до ресурсу розвитку, але не всі знають, як витягти з неї знання. Стратегії розвитку передових країн спрямовані на отримання нової інформації для створення передових технологій. Тому сучасний інженер-біотехнолог повинен не лише добре знати свою справу, а й брати участь у наукових дослідженнях і робити вагомий внесок у скарбницю природничих знань.

Наукове дослідження – це процес отримання нових знань, і відтворюваність його результатів є вирішальною умовою. Повторюваність результатів експерименту визначається технікою виконання та обробки, оскільки без статистичного аналізу цю величину важко оцінити.

Завдання експериментатора є винятково складним у зв'язку з величезним спектром біологічних форм, їх мінливістю в онтогенезі і поколіннях, складною багаторівневою організацією. Це є причиною обмеженої повторюваності результатів багатьох досліджень, і, як наслідок, теоретичні узагальнення недостатньо представлені в біології (порівняно з іншими дисциплінами). Фундаментальним недоліком сучасної експериментальної парадигми в біотехнології є складність порівнянності отриманих результатів, що зумовлено високою гетерогенністю та низькою точністю визначення стану біологічної особини.

Різноманітність популяції мікроорганізмів може значно ускладнити дослідження. Однією з першочергових причин зниження ефективності біотехнологічного процесу є генетична нестабільність штамів-продуцентів.

Порівняння зібраних даних можливе лише за тих самих експериментальних обставин, забезпечуючи повторюваність їх результатів. Ця проблема особливо очевидна в біотехнологічних операціях, які використовують ряд хімічних, фізичних і біологічних підходів для дослідження предмета.

Звичайним методом зменшення випадкової помилки є використання теорії ймовірностей. Повторення вимірювань підвищує точність отримання середнього результату, але також

збільшує розкид поточних показань. Якщо ми розглядаємо випадковість як невідому закономірність, то виникає питання «як із випадковості виділити закономірності?».

Причиною уповільнення темпів розвитку науки є не тільки брак матеріальних ресурсів, що обмежує можливість дослідження обраного об'єкта, а й інертність мислення суб'єкта. Огляд наукових статей з біології та медицини показує, що більше половини з них використовують некоректні методи статистичної обробки або взагалі не аналізують надані дані.

Розвиток дослідницької роботи залежить від застосування передових технологій як у вимірюванні, так і в обробці даних. Аналогом є розвиток комп'ютерних технологій, який здійснюється шляхом розширення можливостей операційної системи та її програмного забезпечення.

У будь-якому науковому процесі, особливо в експериментальних дослідженнях, як і в усіх галузях прикладної біології, медицина, біотехнології маємо справу з цифрами, даними про розміри, вагу, вік, співвідношення між ознаками, дозування факторів, різні діагностичні та інші тести, інші кількісні показники та числові характеристики. За цими, здавалося б, хаотичними цифрами ховаються певні закономірності, що потребують об'єктивної оцінки та наукового пояснення. Тут найбільшого поширення набули різні методи та прийоми біометрії – варіаційної (математичної) статистики, що розробляються за допомогою відповідних математичних апаратів для оцінки різних зв'язків між біологічними явищами, об'єктами та процесами, залежностями, що показують достовірність їхнього існування. Це особливо важливо при дослідженні та розумінні великих об'ємів цифрового матеріалу, отриманого під час експериментів чи спостережень.

Біотехнології, біологія неспроможні розвиватися без математики. Математика потрібна насамперед в описах біологічних сукупностей, таксономічних підрозділів, популяцій, ліній, різновидів, експериментальних популяцій тощо. Необхідна для всебічного вилучення інформації про типові об'єкти, їх різноманітність, структуру різноманітності, системи біологічних зв'язків і взаємодій, різні біологічні середовища, вплив різних факторів на біологічні об'єкти, що відбуваються в різних умовах.

Деякі біологічні завдання не можна вирішити без застосування спеціальних математичних методів. До таких завдань належать порівняння вибірових груп за досліджуваними параметрами та визначення достовірності результатів порівняння та ймовірності безпомилкового прогнозу, визначення достатньої кількості піддослідних, вимірювання впливу різних факторів на біологічні процеси та явища, формули та номограми для практичного застосування залежності основних та сигнальних характеристик та розробка алгоритмів автоматизованої діагностики та прогнозування в біології, сільському господарстві та медицині.

Сучасна біологія містить ряд питань, які не можуть бути вирішені тільки математично, а також і складні для розуміння без відповідної математичної підготовки. Без розуміння основ дисперсійного аналізу, наприклад, дуже глибоке і цінне поняття спадковості зазвичай сприймається з великими труднощами і не завжди правильно. У результаті як у теорії, так і на практиці часто робляться невірні висновки та необгрунтовані прогнози.

Без створення спеціалізованих математичних методів були б неможливі навіть найновіші питання біологічної теорії — теорія популяції та математичне моделювання біологічних процесів.

Сучасному біотехнологу та біомедінежеру необхідно знати основи арифметики. Найуспішніші способи співпраці біологів, біотехнолоів і математиків, а також найефективніший спосіб інтеграції математики в біологію були очевидні завдяки багаторічному досвіду використання математики в біології.

Досвід показує, що, окрім найпростіших математичних операцій, математика покращує біологію лише тоді, коли поєднується з нею в унікальній модифікованій формі, призначеній для вирішення біологічних проблем. Модифікація передбачає вибір уже існуючих математичних методів і їх застосування для вирішення біологічних проблем, розробку нових спеціалізованих методів і моделей, створення спеціалізованих математичних алгоритмів і, нарешті, вдосконалення біоматематичної термінології та символів.

Комплекс нових методологій розвиває свої власні характерні відмінності на конкретному етапі розвитку цього синтезу біології і математики та постає як окрема область дослідження.

На стику біології та математики формується нова синтетична наука зі своєю областю дослідження, особливими базовими методами, своєрідною мовою, символікою та специфічними завданнями. Якщо уникати вживання слова «статистика варіацій», краще було б називати цю нову галузь дослідження «біометрією», яка зараз визнана більшістю біологів. Виходячи з її сучасної еволюції, цю науку можна визначити наступним чином : вивчення статистичних групових властивостей у біології відоме як біометрія. У цьому контексті під статистичним аналізом розуміється певний набір постулатів і прийомів із теорії ймовірності математичної статистики, які були скориговані з урахуванням особливостей біологічних об'єктів і особливостей біологічних досліджень. Групові якості, досліджувані біометрією, виникають лише тоді, коли біологічні об'єкти об'єднуються в групи, а без цього зв'язку вони не існують. Оскільки окремі об'єкти не можуть мати групових якостей, ці властивості відрізняють групу від простої суми її членів.

Біометрія досліджує специфіку кількох явищ. Якщо вимірювання властивості досягнуто в окремій особини, ця єдина характеристика може бути дуже важливою та предметом вивчення в суто біологічних науках, таких як анатомія, гістологія, фізіологія тощо. Однак цю єдину властивість не можна використовувати для дослідження біометрії, оскільки один об'єкт не є групою.

Біометричний аналіз може бути застосований до будь-якого неодноразового явища, розділеного на групи будь-якого розміру, починаючи з  $n = 2$ . Це не означає, що сучасна біометрія здатна отримувати точні результати для будь-якої кількості перевірених об'єктів. У більшості випадків практично корисні прогнози в біології отримують шляхом вивчення досить великих груп.

Без правильної обробки даних біологічних експериментів і систематизації, без глибокого і повного їх вивчення важко отримати достовірну інформацію, засновану на реальних даних цих досліджень. Цю проблему можна ефективно вирішити шляхом вдалого поєднання біології та математики, яка є ядром біометрії як науки.

Біометрія з'явилася разом з еволюцією життя. Математичні підходи до біометрії були вперше створені в дев'ятнадцятому столітті Френсісом Гальтоном і Карлом Пірсоном. З розвитком

ідеї малих вибірок у ХХ столітті з'явилися праці В. Госета, який писав під псевдонімом Стьюдент, а Ф. Фішер винайшов метод дисперсійного аналізу.

**Біометрія** (біологічна, варіаційна статистика, від *bio...* та грецького *μετρέω* – вимірюю) – вивчення статистичного аналізу групових ознак біологічних об'єктів. Біометрію іноді описують як науку про мобільність групової інформації в популяціях. Встановлення істини про те, що багато біологічних процесів характеризуються статистичними закономірностями, послужило основою для застосування біометрії в біології (ймовірність прояву, закон розподілу варіанта за наявності їх великої кількості у вибірковій сукупності).

*Предметом* дисципліни «Біометрія» є концепції планування біологічного експерименту та статистичної обробки експериментальних даних.

Біометрія — це дисципліна біології, яка займається плануванням експериментів і статистичним аналізом їх результатів.

Математична статистика та теорія ймовірностей — це розділи математики, які вивчають масові явища без урахування особливостей їх окремих частин.

Здатність організувати біологічний експеримент з метою отримання достовірного результату з мінімальними витратами часу і матеріальних ресурсів є головною відмінністю біометрії, математичної статистики і теорії ймовірностей.

На сьогоднішній день можна виділити наступні *основні напрямки розвитку біометрії*:

- підвищення ефективності біологічних, біомедичних досліджень;
- підвищення відтворюваності результатів біологічного та біомедичного експерименту;
- детальне викладення принципів планування, проведення експерименту та аналізу отриманих результатів;
- розробка методів математичного моделювання як інструменту наукових досліджень;
- застосування поняття багатofакторної біометричної ідентифікації об'єктів.



Біометрія - це здатність кількісно оцінювати і вимірювати значимість і достовірність отриманих результатів, попередньо розраховувати і планувати кількість піддослідних, необхідну для конкретного експерименту, оцінювати достовірність гіпотез, що перевіряються в експерименті, декомпонувати отримані результати, в частині охарактеризувати ціле, отримати точні кількісні характеристики. визначити ступінь і характер відмінностей між характеристиками та процесами, виділити з багатьох факторів, що впливають на явище, найбільш важливі, виміряти їх вплив та ін.

Методологія варіаційної частини біометрії полягає у відділенні випадковості від закономірності та доказ існування закономірного у видимому хаосі мінливості. Ігнорування або недооцінка статистичної обробки та математичного аналізу отриманого дослідником матеріалу може звести нанівець багато важливих експериментальних результатів і призвести до необґрунтованих чи хибних висновків. Навпаки, вміле використання біометрії може підвищити інформаційну цінність дослідження, дати експериментатору нові знання, допомогти у проектуванні експериментів, розумінні отриманих даних, об'єктивній оцінці результатів масових спостережень, виявленні прихованих закономірностей та його правильної інтерпретації.

Статистична обробка даних, як би не була розвинена математика, не гарантує якість дослідження біолога та біомедичного інженера і не може гарантувати достовірність результатів, якщо дослідження помилково або використовували дані недосконалі. Більше того, формальне застосування математичних методів без розуміння їх природи та застосування до того чи іншого біологічного явища, зловживання статистикою змінних в цілому, сліпе їх використання, незважаючи на відсутність необхідності, може принести лише шкоду. Підміна біологічних методів математичними, недооцінка варіаційних та статистичних методів, недооцінка ролі математичної обробки однаково неприпустимі у роботі біологів.

Час, коли необхідно спеціально наголошувати на важливості статистичної обробки даних у біологічних дослідженнях, здається, минуло. Проте деякі стверджують, що в цьому, як і раніше, немає необхідності. Вони кажуть, що математика лише кількісно описує

закономірності, які помітні компетентним біологам і без математики. Частково це правда. Однак недостатньо знайти закономірності, потрібно показати їхню реальність, яка в кінцевому підсумку має бути оцінена кількісно. Статистичний аналіз проводиться з двома цілями: кількісно охарактеризувати біологічний об'єкт, явище або процес, виявити його діапазон та тенденції, а також довести об'єктивність, специфічність та обґрунтованість його існування та відмінності від інших явищ та процесів. Серед кількісних характеристик об'єкта, явища або процесу показовими є багато статистичних параметрів: середнє арифметичне, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт варіації, асиметрія, ексцес, кореляція, регресія, коефіцієнт кореляції, міра потужності, міра відстані  $n$ . Потім з метою оцінки надійності певних висновків розраховуються різні статистичні критерії, переважно  $t$ -Ст'юдента,  $R$  Фішера і  $\chi^2$ -квадрат. Сама процедура статистичного аналізу включає низку послідовних етапів:

1. Вивчати біологічні явища, накопичувати дані, формулювати біологічні проблеми та питання, що вимагають статистичної оцінки.

2. Вибирати статистичні методи, показники та критерії, необхідні для кількісної оцінки досліджуваного (аналізованого) процесу чи явища, виходячи з характеру проблеми.

3. Висування нульової гіпотези, розрахунки за алгоритмом, формулювання статистичних висновків.

4. Біологічна інтерпретація результатів статистичного процесу.

Біометрія — це набір математичних підходів, що використовуються в біології, які в основному походять із галузей математичної статистики та теорії ймовірностей. Біометрія найбільш тісно пов'язана з математичною статистикою, результати якої в першу чергу використовує, але вона також впливає на розвиток математичної статистики. Біометрія має свої особливості та особливу роль у системі біологічних наук. Сучасна біометрія — це область біології, яка займається плануванням спостережень і статистичним аналізом їх результатів; математична статистика та теорія ймовірностей є підмножинами цієї галузі.

Біометрія – це прикладна дисципліна, що використовує математичні підходи для вивчення конкретних біологічних об'єктів. Біометрія розроблена з біологічних потреб і базується на індуктивній методиці, яка починається з матеріальних даних і аналізує їх за допомогою математичних інструментів.

Відмінною рисою біометрії є те, що її методології застосовуються для аналізу сукупностей фактів, тобто явищ масового характеру, в яких виявляються закономірності, не характерні для одиничних спостережень.

### **Контрольні запитання**

- 1. Історія розвитку біометрії?*
- 2. Предмет і завдання дисципліни?*
- 3. Основні напрямки розвитку біометрії?*
- 4. Етапи проведення статистичного аналізу?*

FOR AUTHOR USE ONLY

## ТЕМА–11. ОСНОВИ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

### **1. Історія розвитку нанотехнологій.**

Приставка нано- (від грецького *NANNOΣ* - карлик, гном) означає одну мільярдну ( $10^{-9}$ ) чого-небудь. *Нанотехнологія* має справу з різноманітними структурами речовини, характерний розмір яких порядку мільярдних часток метра.

При наноструктуруванні матеріали можуть отримувати нові властивості і незвичайні характеристики.

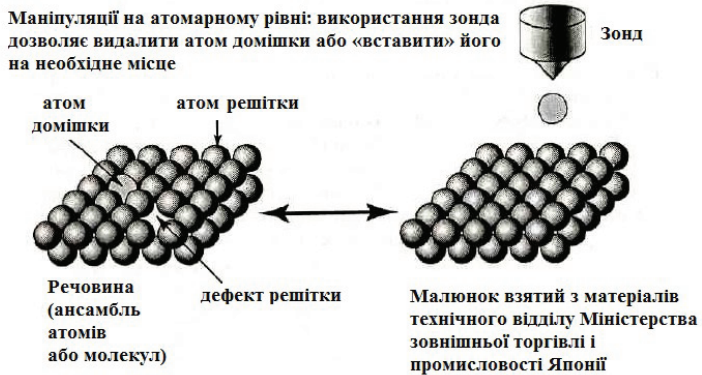
Якщо розміри тривимірної наноструктури мають порядок нанометра тільки в одному виміру, така структура називається квантовим колодезем. Його електронна структура сильно відрізняється від такої у зразків, які мають нанометрові розміри по двох вимірах і називаються нанодротоми. Квантові крапки мають нанометрові розміри по всіх трьох вимірах. Залежність електронних властивостей від розміру призводить до суттєвих змін оптичних характеристик нанозразків і їх властивостей.

Таким чином, нанотехнологія як би об'єднує всі технічні процеси, пов'язані безпосередньо з атомами і молекулами. Саме тому вона є перспективною для отримання нових конструкційних матеріалів, напівпровідникових приладів, пристроїв для запису інформації, для застосування в медицині, біології і багатьох інших областях.

Нанотехнологію можна визначити як набір технологій, заснованих на маніпуляціях з окремими атомами і молекулами регулювання структури і складу речовини в масштабах від 1 до 100 нм. Використання характерних особливостей речовин на відстанях порядку нанометрів створює нові можливості для створення технологічних прийомів, пов'язаних з електронікою, матеріалознавство, хімією, механікою і багатьма іншими областями науки. Отримання нових матеріалів і розвиток нових методів обіцяє провести справжню науково-технічну революцію в інформаційних технологіях, виробництві конструкційних матеріалів, виготовленні фармацевтичних препаратів і конструюванні надточних пристроїв.

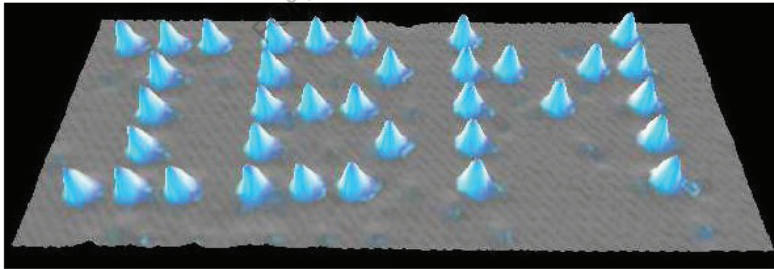
Класичним прикладом останніх досягнень нанотехнологій стала розробка скануючих тунельних мікроскопів (СТМ). Перший такий мікроскоп був створений в лабораторії фірми

ІВМ для дослідження особливостей і неоднорідності поверхні монокристалів кремнію (рис.1).



**Рис.1.** Ілюстрація принципу дії скануючого тунельного мікроскопу (СТМ).

Приклад обробки речовини за допомогою скануючого тунельного мікроскопу наведено на рис.2., де на світлинці зображено найменші букви на світлі (напис з 35 атомів ксенону утворює назву фірми ІВМ).



**Рис.2.** Можливості нанотехнології при маніпуляції на рівні атомів.

Широкий інтерес до нанооб'єктів, обумовлений принаймні, трьома обставинами:

по-перше, методи нанотехнології дозволяють отримати принципово нові пристрої і матеріали з характеристиками, які

значно перевершують їх сучасний рівень, що вельми важливо для інтенсивного розвитку багатьох областей техніки, біотехнології, медицини, охорони навколишнього середовища, оборони тощо;

по-друге, нанотехнологія виявилася вельми широким міждисциплінарним напрямком, об'єднуючим фахівців в галузі фізики, хімії, матеріалознавства, біології, медицини, технології, наук про Землю, комп'ютерної техніки, економіки і соціології;

по-третє, рішення проблем нанотехнології виявило багато прогалин як у фундаментальних, так і в технологічних знаннях, що сприяло концентрації уваги науково-інженерного співтовариства в цьому напрямку.

У багатьох країнах (США, Об'єднана Європа, Японія, Китай) прийняті національні програми, що передбачають інтенсивний розвиток нанотехнологічних досліджень і розробок. Велика увага приділяється також підготовці кадрів.

Чи можливо методами нанотехнологій створити надлегкі і надміцні матеріали?

Насправді основа для таких матеріалів вже створена. Вчені виявили, що при певних умовах (наприклад, тривале нагрівання тощо) атоми вуглецю переходять в новий фазовий стан - вуглецевої нанотрубки. Тонкі нитки ділянок таких утворень легко спостерігаються в електронному мікроскопі. Вуглецеві нанотрубки не тільки набагато легші і міцніші металів, але і володіють напівпровідниковими характеристиками, які зараз цікавлять дослідників всіх країн.

Чи можна сконструювати крихітні пристрої, що запам'ятовують і мають величезний обсяг пам'яті?

Добре відомо, що підвищення швидкодії комп'ютерів обумовлено зменшенням розмірів елементів електричних ланцюгів, що забезпечують проходження і переробку електричних сигналів. Однак розміри електронних мереж і ліній не можна зменшувати до нескінченності, оскільки вже при існуючому рівні мініатюризації починаються нові фізичні явища (квантово-механічні ефекти). Вчені давно думають над тим, як використовувати ці ефекти для створення нових пристроїв і приладів.

Далі перерахуємо лише деякі з пріоритетних напрямків нанотехнології, які розробляють нові перспективні методи, матеріали та пристрої:

- молекулярний дизайн матеріалів і речовин із заданими властивостями, що значно переважають властивості їх сучасних аналогів;
- нанопроцесори з низьким рівнем енергоспоживання і істотно більш високою продуктивністю;
- невеликі за розміром пристрої, що запам'ятовують інформацію з великого об'єму;
- нові лікарські препарати і методи їх введення в організм;
- нові методи моніторингу довкілля та організму людини з використанням наносенсорів.

Серед наноматеріалів можна виділити кілька основних різновидів: *консолідовані наноматеріали, нанонапівпровідники, нанополімери, нанобіоматеріали, фуллерени, каталізатори і нанопористі матеріали.*

До *консолідованих наноматеріалів* відносять компакти, плівки і покриття з металів, сплавів і з'єднань, що одержуються методами порошкової технології, інтенсивної пластичної деформації, контрольованої кристалізації з аморфного стану і різноманітними прийомами нанесення плівок та покриттів.

*Нанонапівпровідники, нанополімери і нанобіоматеріали* можуть бути як в ізольованому, так і частково в консолідованому стані, утворюючи також гібридні (змішані) матеріали.

*Фуллерени і тубулярні наноструктури* стали предметом численних досліджень, починаючи з 1985 року, коли була ідентифікована нова алотропна форма вуглецю - кластери  $C_{60}$  і  $C_{70}$ , названі фуллеренами (роботи нобелівських лауреатів Н.Крото, Р.Керрі і Р.Смолли), і особливо з 1991 р., коли японський вчений З. Ішіма виявив вуглецеві нанотрубки в продуктах електродугового випаровування графіту.

*Нанопористі матеріали* характеризуються розміром пор, які менші за 100 нм. Також одними із прикладів, які давно досліджуються методами нанотехнології є наступні.

*Супрамолекулярні структури* - це наноструктури, що одержуються в результаті нековалентного синтезу з утворенням

слабких (ван-дер-ваальсових, водневих і ін.) хімічних зв'язків між молекулами і їх ансамблями.

Особливо слід зупинитись на деяких термінологічних особливостях. Великого поширення набули такі терміни з приставкою «нано», як «нанотехнологія», «наноелектроніка», «нанохімія». В американській літературі поняття «нанотехнологія» прийнято визначати як вміння цілеспрямовано створювати і використовувати матеріали, пристрої та системи, структурні елементи яких мають розмір в діапазоні 1 - 100 нм.

Наука про малорозмірні об'єкти (*Nanoscience*) - це сукупність знань про властивості речовин і явищ у нанометровому масштабі. наночастки (нанопорошки). «Нанопорошки» це малорозмірні тверді речовини, геометричний розмір яких змінюється від десятих часток до 100 нм. Поняття «наночастинки» і «нанопорошки» багато в чому перекриваються, але, звичайно, слід мати на увазі можливий ізольований характер перших і обов'язково сукупний вид останніх (порошок – це сукупність, що проявляється у поєднанні індивідуальних твердих частинок невеликих розмірів (від 0,001 до  $10^3$  мкм). Вважається, що наночастинки зі зменшенням розміру переходять в кластери, які містять від 10-ти до декількох тисяч атомів. Вважають також, що для кластерів, на відміну від кристалічних частинок, характерна втрата трансляційної симетрії. До наночастинок зараз відносять і напівпровідникові квантові крапки.

## **2. Природні кордони розвитку існуючої мікроелектроніки. Квантові ями, дрти і точки.**

В 1990 році почалася реалізація великого міжнародного проекту по визначенню послідовності укладання близько 3 мільярдів нуклеотидних залишків в запису генетичної інформації, який став яскравим проривом в біології та медицині. Цей проект одночасно є виключно важливим для розвитку нанотехнологій, оскільки відкриває нові можливості в інформаційних технологіях, дозволяючи зрозуміти, а потім і використовувати принципи обробки інформації в живій природі («біоінформатика»). Можна навіть сказати, що до 1990 року інформаційна технологія (ІТ) була всього лише складовою частиною або «гілкою» електроніки, а після 1990 року від неї



відросла незалежна окрема гілочка, яку можна назвати біоінформаційною технологією.

В таблиці 1. Приведена хронологія основних досягнень нанотехнології.

Проект «геном Людини» був завершений в 2000 році і дозволив вченим прочитати генетичну інформацію, пов'язану з людським організмом, що вже призвело до створення нових ліків за новими принципами і на новій основі (геноміка). Наступним природним етапом став розвиток нових галузей фармацевтичної промисловості і створення нових виробничих процесів і потужностей, а також розширення сфери всього бізнесу і ділової активності в цій великій галузі.

Квантові ями, дроти і крапки. Властивості великих (об'ємних, макроскопічних) зразків матеріалів в більшості випадків описуються законами класичної фізики. Метрична розмірність таких об'єктів (систем) становить 3D. При плавному зменшенні розмірів зразка від великих (макроскопічних) значень, наприклад, метра або сантиметра, до дуже маленьких, властивості спочатку залишаються незмінними, потім починають повільно змінюватися, а при розмірах менш 100 нм можуть змінитися радикально.

**Таблиця 1.**

Коротка хронологія основних досягнень в даній області

Роки	Істотні досягнення в області нанотехнологій
1928	Запропоновано принципову схему скануючого оптичного мікроскопа
1932	Створення першого просвічуючого електронного мікроскопа
1938	Створення першого скануючого електронного мікроскопа
1959	Річард Ф. Фейнман (США) висунув ідею створення речовин і об'єктів метолом поштучного «атомарної» збірки
1972	Створено реальний пристрій, що працює за принципом мікроскопа ближнього поля

1981	Створення скануючого тунельного мікроскопа (СТМ)
1985	Створення першого польового транзистора з високою рухливістю носіїв (HEMT). Хіміки синтезували перші фуллерени
1986	Ерік К. Дрекслер (США) висунув концепцію створення «молекулярних машин». Створення атомно-силового мікроскопа (АСМ)
1991	В Японії почалася реалізація державної програми з розвитку техніки маніпулювання атомами і молекулами (проект «Атомна Технологія»)
1998	Виготовлений елемент пам'яті електронного пристрою, що запам'ятовує (з об'ємом пам'яті 128 Мегабіт), який працює при кімнатній температурі
2000	США приступили до реалізації програми досліджень, названої Національною Нанотехнологічною Ініціативою (ННІ)

**Квантова яма (КЯ) – quantum wells (QW).**

Якщо розміри зразка в одному вимірі лежать в нанометровому діапазоні, а в двох інших залишаються великими, то вийшла структура називається квантовою ямою, а метрична розмірність такого об'єкта - 2D.

**Квантовий дріт (КД) – quantum wires (QWr)**

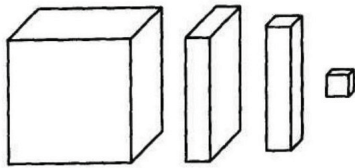
Якщо зразок малий в двох вимірах і має великі розміри в третьому, то такий об'єкт називають квантової дротом з метричної розмірністю 1D.

**Квантова крапка (КК) – quantum dots (QD)**

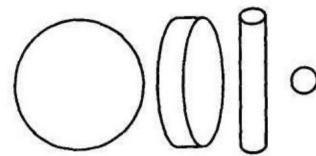
Граничний випадок цього процесу зменшення розмірів, при якому розміри у всіх трьох вимірах лежать в нижній частині нанометрового діапазону, називається квантовою крапкою – 0 D-мірний об'єкт (рис.5).

Епітет «квантовий» в назвах цих трьох типів наноструктур використовують тому, що області ультрамалих масштабів виникає зміна властивостей квантово-механічної природи. Рисунок 3 ілюструє цей процес зменшення розмірів для прямокутної геометрії. На рис.4. показано той же процес для криволінійної

геометрії. Іншими словами, з'являється вплив розмірності на властивості зразка у випадках, коли одне, два або всі три виміри малі. Особливо цікавим є вплив таких змін на електронні властивості.



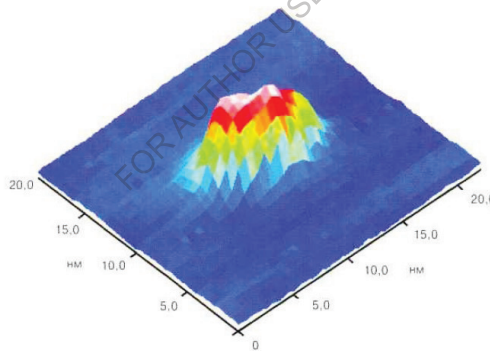
Об'єм яма, дріт, крапка



Об'єм, яма, дріт, крапка

**Рис.3.** Послідовність прямокутних наноструктур

**Рис.4.** Послідовність круглих наноструктур.



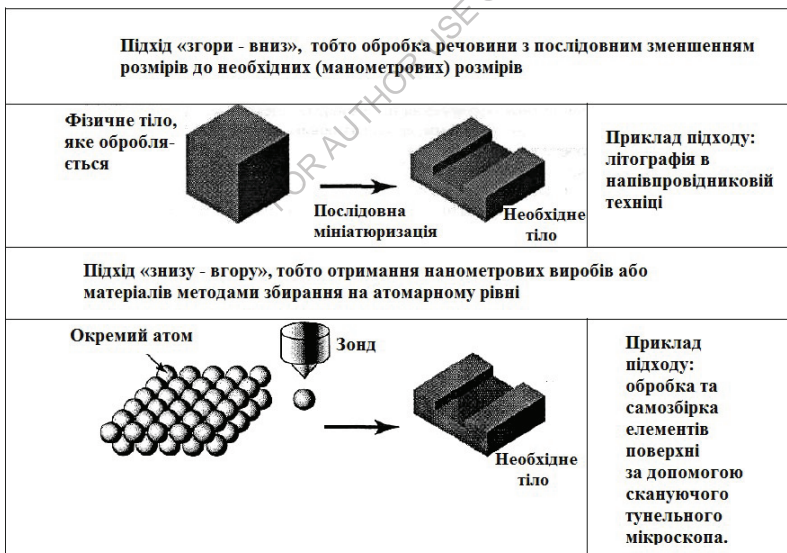
**Рис.5.** Тривимірне зображення однієї квантової крапки Ge на підкладці Si, отримане за допомогою атомно-силового мікроскопа.

Коротко розглянемо одну з основних концепцій, яка відіграє найважливішу роль для розвитку нанотехнології. Йдеться про два принципово різні підходи до обробки речовини і створення планованих виробів. Ці підходи прийнято умовно називати технологіями «зверху - вниз» і «знизу - вгору» (Рис.6.).

Підхід «зверху - вниз» заснований на зменшенні розмірів фізичних тіл механічної або іншої обробкою, аж до отримання об'єктів з ультрамікроскопічних чи нанометровими параметрами.

Ідея технології «знизу - вгору» полягає в тому, що збірка створюваної «конструкції» здійснюється безпосередньо з елементів «нижчого порядку» (атомів, молекул, структурних фрагментів біологічних клітин і т. п.), наявних необхідному порядку. Цей підхід можна вважати «зворотним» по відношенню до звичного методу мініатюризації «зверху - вниз», коли ми просто зменшуємо розміри деталей.

В основі системи знань про об'єкт досліджень безумовно лежить аналіз його матеріально-матеріального базису, структурного упорядкування і стійкості, просторово-тимчасової організації, а також кількісне і якісне прояв традиційних і раніше невідомих властивостей в залежності від умов синтезу і функціонування.



**Рис.6.** Два головних нанотехнологічних принципу обробки матеріалів

Найбільш характерними проявами «наносвіту», навіть у порівнянні з традиційними об'єктами з мікроскопічними характеристичними розмірами, є:

- поява нетрадиційних видів симетрії і особливих видів сполучення кордонів розділу, конформацій з структурою, яка динамічно перебудовується;
- домінування над процесами штучного впорядкування явищ самовпорядкування і самоорганізації, що відображають прояв ефектів матричного копіювання та особливостей синтезу в умовах, далеких від рівноважних;
- висока «польова» (електрична, магнітна) активність і «каталітична» (хімічна) вибірковість поверхні ансамблів на основі наночастинок, включаючи інтегровані композиції неорганічної та органічної природи;
- особливий характер протікання процесів передачі енергії, заряду і конформаційних змін, відрізняються низьким енергоспоживанням, високою швидкістю і носять ознаки кооперативного синергетичного процесу.

Можна запропонувати наступні причини прояву вищевказаних особливостей в умовах «наносвіту»:

- зміна внеску в різні процеси на поверхні частинки по відношенню до об'єму при переході до нанорозмірних систем;
- енергетична, польова і «речова» нерівноважність поверхні, яка охоплює значні об'єми наночастинок;
- посилення ролі різних видів розмірних ефектів із-за значної площі кордонів розділу в умовах наноконпозицій;
- прояв в умовах великих колективів енергетично активних наночастинок нетрадиційних механізмів упорядкування, перенесення енергії і заряду;
- малі характеристичні розміри частинок і особливий характер їх упорядкування, забезпечують енергетичну і просторову доступність транспорту заряду, енергії і конформаційних змін.

Виходячи з наведеного вище, можемо дати наступні визначення основних термінів нанотехнології.

Наносистема – це матеріальний об'єкт у вигляді впорядкованих або самовпорядкованих, пов'язаних між собою елементів з нанометричними характеристичними розмірами, кооперація яких забезпечує виникнення у об'єкта нових

властивостей, що виявляються у вигляді квантово-розмірних, синергетично-кооперативних, «гігантських» ефектів та інших явищ і процесів, пов'язаних з проявом наномасштабних факторів.

Наноматеріали - речовини і композиції речовин, які представляють собою штучно або природно впорядковану чи невпорядковану систему базових елементів з нанометричними характеристичними розмірами і особливим проявом фізичних і (або) хімічних взаємодій при кооперації нанорозмірних елементів, які забезпечують виникнення у матеріалів і системах сукупності раніше невідомих механічних, хімічних, електрофізичних, оптичних, теплофізичних та інших властивостей, визначених проявом наномасштабних факторів.

Нанотехнології - сукупність методів і способів синтезу, збірки, структуро- і формоутворення, нанесення, видалення і модифікування матеріалів, включаючи систему знань, навичок, умінь, апаратне, матеріалознавче, метрологічне, інформаційне забезпечення процесів і технологічних операцій, спрямованих на створення матеріалів і систем з новими властивостями, зумовленими проявом наномасштабних факторів.

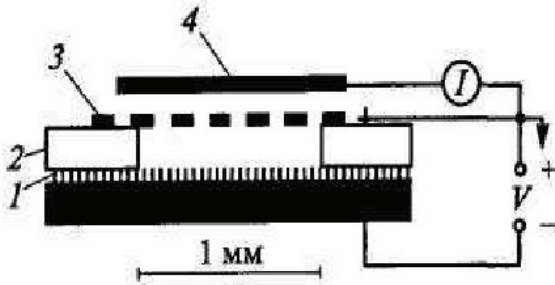
Нанодіагностика - сукупність спеціалізованих методів досліджень, спрямованих на вивчення, структурних, морфолого-топологічних, механічних, електрофізичних, оптичних, біологічних характеристик наноматеріалів і наносистем, аналіз нанокількості речовини, вимір метричних параметрів з наноточністю.

Наносистемотехніка - сукупність методів моделювання, проектування і конструювання виробів різного функціонального призначення, в тому числі наноматеріалів, мікро- і наносистем з широким використанням квантово-розмірних, кооперативно-синергетичних, гігантських ефектів та інших явищ і процесів, виявляються в умовах матеріальних об'єктів з нанометричну характеристичними розмірами елементів.

### **3. Наноструктуровані напівпровідникові матеріали. Наноматеріали для ядерної енергетики і медицини та біології.**

Було встановлено, що перехід до наноструктур в разі напівпровідників супроводжується зміщенням спектрів

люмінесценції в короткохвильову область, збільшенням ширини забороненої зони та іншими явищами, що знаходять цікаві і важливі технічні застосування (рис.7).

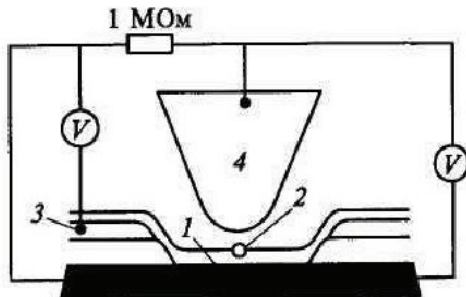


**Рис.7.** Схема польового емітера на основі вуглецевих нанотрубок:  
 1 -плівка, що складається з трубок, розташованих перпендикулярно підкладці, 2 - ізоляція; 3 - сітка; 4 –анод.

Так, монокристалічні наночастинки *CdSe* в полімерних матрицях розглядаються як можливі світлодіоди і оптичні перемикачі для лазерних систем, а також сенсори в біологічних об'єктах.

Високі емісійні властивості вуглецевих нанотрубок - основа для розробки електронних приладів з холодними катодами (електронні дисплеї, джерела рентгенівського випромінювання, катодолюмінесцентні джерела світла тощо), які відрізняються від звичайних аналогів зниженими значеннями напруги живлення і споживаної потужності, а також мініатюрністю і малою масою.

Відомо багато прикладів створення діодів і транзисторів, тобто двох- і трьохелектродних елементів на основі вуглецевих нанотрубок та інших наноб'єктів. Схема одноелектронного молекулярного транзистора показана на рис.8. Кластерні частки на основі Pd і Pt з лігандними оболонками (з'єднання типу  $Pd_3(CO)_3(P(C_6H_5)_3)_3$ ), які розташовані в моношарових плівках стеаринової кислоти на поверхні графіту і там формують впорядковану двомірну ґратку.



**Рис.8.** Схема молекулярного одноелектронного транзистора:  
 1 -плівка Ленгмюра-Блоджетта; 2 -кластер; 3 -керуючий електрод;  
 4 - голка скануючого тунельного мікроскопа

Пористий берилій вважається перспективним для виготовлення тритійвідтворюючого палива термоядерних реакторів. Вироби з берилію пористістю 20 - 30% грають роль відбивача і розмножувача нейтронів. Для підвищення міцності таких виробів і формування мікрокоміркової структури з повністю відкритими порами до звичайного крупнокристалічного порошку берилію додається спеціальна хімічна сполука, розкладання якої за рахунок утворення наночастинок берилію сприяє зміцненню контактів між частинками, а виділення водню - утворенню відкритих пор.

Завдяки великій кількості поверхонь розділу, як шляхів для виходу продуктів опромінення, нанокристалічна структура може виявитися корисною і при створенні міцних оболонкових і паливних матеріалів для тепловиділяючих елементів потужних атомних реакторів.

Завдання збільшення тривалості та якості життя мотивує інтенсивні розробки в області біоматеріалів взагалі і нанобіоматеріалів, зокрема. Основні області застосування наноматеріалів в медицині, біології та сільському господарстві досить різноманітні:

- хірургічний та стоматологічний інструментарій;
- діагностика, наномотори і наносенсори;
- фармакологія, лікарські препарати та методи їх доставки;



- штучні органи і тканини;
- стимулюючі добавки, добрива тощо;
- захист від біологічного та радіологічного зброї.

Розглянемо найбільш характерні приклади. Як біологічно повністю сумісний з живими тканинами титан перспективний в травматології та стоматології для виготовлення протезів тазостегнових, колінних, щелепних і інших суглобів, пластин і спиць для кісткового зрощення, гвинтів для фіксації хребта тощо. Однак нелегований титан володіє невисокими механічними властивостями. Методи інтенсивної пластичної деформації, зокрема, кутове пресування, дозволяють істотно подрібнити матеріал, аж до отримання зерен з розмірами 100 - 200 нм, що в 2 - 3 рази підвищує механічні властивості. Фізико-механічні характеристики наноструктурного титану знаходяться на рівні його кращих сплавів (наприклад, типу Ti-V-Al), однак останні значно поступаються нелегованій титану з біологічної сумісності.

У конструюванні наномашин особливого значення набуває розуміння закономірностей функціонування біологічних систем. Наномашини можуть бути створені і на основі наслідування природних аналогів, але особливості роботи біодвигунів важливі взагалі для створення стабільних мікро- і наноелектромеханічних систем.

Корисно відзначити, що існують, принаймні, два підходи до конструювання нанопристроїв:

- 1) створення надмалих копій відомих макрооб'єктів;
- 2) розробка принципово нових зразків, які не мають традиційних аналогів.

Р. Фейнман більше 40 років тому в відомій доповіді, присвяченій проблемам мініатюризації, звертав увагу на труднощі, що виникають при спробах мікрокопіювання механічних пристроїв. Наприклад, при загальному розмірі мікроавтомобіля 1 мм точність обробки деталей повинна відповідати розмірам близько 10 атомів. Виникає також проблема мастила в нанопроміжках, необхідність створення електроприводу з нанодротів і ін. Виготовлення самих конструкційних деталей мікро- і нанорозміру вимагає використання особливих прийомів

порошкової і полімерної нанотехнології, а також спеціальних методів збирання та контролю.

У той же час створення принципово нових нанопристроїв типу наноелектромеханічних систем ґрунтується на невідомих раніше явищах.

Наприклад, в наноприводах на основі багат шарових вуглецевих нанотрубок використовуються, як електропровідні властивості останніх, так і їх низькі фрикційні характеристики, що, звичайно, вимагає детального дослідження і розуміння природи цих властивостей. На відміну від біодвигунів такі наноелектромеханічні системи можуть працювати в широкому діапазоні температур (від низьких температур аж до декількох сотень градусів) і в різних агресивних середовищах. Вважають, що такі нанодвигуни можуть знайти застосування в оптичних перемикачах, комп'ютерах і телефонах. Повідомляється також, що вимірювання переміщень на рівні тисячних часток нанометра, яке може здійснюватися за допомогою наноелектромеханічних систем на основі давача з GaAs в сукупності з одноелектронними транзисторами.

### **Контрольні запитання**

- 1. Охарактеризуйте основні етапи розвитку нанотехнологій.*
- 2. Чим зумовлений інтерес до наноб'єктів та нанотехнологій?*
- 3. Якими є на даний час пріоритетні напрямки розвитку нанотехнологій? Якими є основні досягнення нанотехнологій?*
- 4. Охарактеризуйте відмінності в термінах «квантова яма», «квантовий дріт» і «квантова крапка» і «нанодіагностика».*
- 5. Якою є сутність підходів в нанотехнологіях, виражається формулами «зверху-вниз» і «знизу-вгору»?*
- 6. Охарактеризуйте сутність нанотехнологій для ядерної енергетики і напівпровідникові наноматеріали?*
- 7. Якими є основні області застосування наноматеріалів в БМІ?*

## **ТЕМА–12. НАНОТЕХНОЛОГІЇ І НАНОМАШИНИ В БІОМЕДИЧНІЙ ІНЖЕНЕРІЇ**

### **1. Вступ до біонанотехнології.**

*Біонанотехнологія* – це розділ нанотехнології, що займається вивченням і впливом об'єктів нанодіапазону на біологічні об'єкти (БО) і їх використанням для розвитку наномедицини, зокрема, для створення наноліків, медичних наноматеріалів, розробки медичних нанороботів, діагностичних систем на основі наночастинок, імунохроматографічних тестів, а також проведення світлових і електронно-мікроскопічних імуноморфологічних досліджень.

*Нанобіотехнологія* - це конструювання нових матеріалів і пристроїв на основі природних або синтетичних макромолекул, конструювання нових біологічних структур на основі синтетичних біополімерів. Молекулярні біологи мають справу з об'єктами порядку на рівні декількох нанометрів: вага віруси, білки, рибосоми, молекули ДНК, які теж потрапляють в цей розмір.

Молекулярно-біологічні об'єкти мають ряд важливих властивостей. Зокрема, вони здатні вибірково взаємодіяти один з одним: наприклад білки мають здатність зв'язуватися з іншими певними білками і органічними молекулами. Всім відомо, що два ланцюжки ДНК утворюють двоспиральну структуру. Механізм вибіркової взаємодії біомолекул розшифрований, молекули ці можна отримувати у великих кількостях біотехнологічними методами і на їх основі створювати нові матеріали. У структуру цих матеріалів можуть бути вбудовані з високим ступенем впорядкованості будь-які речовини і нанооб'єкти, в тому числі і металеві наночастинок.

Біонанотехнології можна застосовувати не тільки для створення нових матеріалів. На основі біомолекул можливе створення «молекулярних машин», різних пристроїв і сенсорів. Доведено, що з молекул ДНК можна зробити рухомі наноструктури, «крокуючі роботи», здатні пересуватися в певному напрямку по молекулі ДНК при підведенні до них енергії. Що стосується наносенсорів (молекулярних сенсорів,

сенсорів на основі гібридних конструкцій, які складаються з нуклеїнової кислоти і білка), то вони вже знаходять широке застосування в молекулярній діагностиці.

На даний час розроблені оригінальні біосенсори для візуалізації певних вірусних РНК. Перевагами нових нанобіосенсорів є: селективність по відношенню до РНК, висока чутливість і стабільність біосенсорів. Вкрай важливим напрямком є створення з ДНК нових матеріалів, різних двомірних і тривимірних структур. На їх основі можуть бути отримані абсолютно нові матеріали для електроніки. Ведуться роботи по отриманню хімічно модифікованих нуклеїнових кислот, які необхідні для отримання таких матеріалів.

Найважливішим завданням біонанотехнології є створення засобів доставки терапевтичних препаратів в певні види клітин. Зокрема, необхідне створення методів введення в клітини ДНК і РНК для розвитку генотерапії. Для стимуляції зв'язування нуклеїнових кислот з клітинами запропоновано формувати з них комплекси, що представляють собою нанорозмірні частинки. Такі частинки ефективно зв'язуються з клітинної поверхнею, що сприяє їх успішному поглинання клітиною. Ці дослідження відкривають можливість створення дієвих методів генотерапії. Одним з найбільш розвинених напрямів нанотехнологій є біочіпові технології, без яких сучасна біологія і медицина вже не можуть існувати. Біочіпова технологія - сучасна нанотехнологія аналізу генетичного матеріалу, що дозволяє проводити скринінг складних сумішей нуклеїнових кислот. Це індустрія високих технологій, що базується на сучасних досягненнях хімії, біології, фізики, мікроелектроніки, інформатики та інших галузей знань.

*Біочіп* є пластинкою, яка несе на своїй поверхні безліч різних зондів - фрагментів нуклеїнових кислот або олігонуклеотидів, розміщених в строгому порядку. За допомогою такого чіпа можна спостерігати за функціонуванням всіх генів в організмі людини - все це вже робиться в сучасних лабораторіях.

Сьогодні вже створені чіпи для виявлення різних варіантів вірусу віспи, розроблені комплексні високочисті вакцини, швидко адаптуються до мутуючим вірусам; тест-системи на основі біочіпів для діагностики туберкульозу, серцево-судинних та онкозахворювань; нанокристалічна кераміка для кісткової

хірургії; внутрішньокісткові імплантанти з біоактивними нанокерамічними покриттями, які сприяють швидкій імплантації і закріпленню кісткової тканини в поверхні імплантатів і нові лікарські препарати. Так, біочіпи для виявлення лікарсько-стійких форм туберкульозу скорочують час діагностики з 6-10 тижнів до одного дня, що дозволяє оперативно призначити адекватну терапію.

Таким чином, на даний час дослідження в сфері БМІ проривного характеру пов'язані з використанням процесів самоорганізації та самозбірки нанооб'єктів, використанням квантових властивостей наноструктур і застосуванням методів наноконструювання в інформаційних, хімічних, біологічних і медичних технологіях.

## **2. Нанороботи і біонаноелектроди**

На відміну від попередніх електронних приладів, які дозволяли лише спостерігати мікросвіт, нанозонди дають можливість змінювати наш світ, будувати в ньому, як з цеглинок, молекули з будь-якими властивостями. Зміни відбуваються крім як з бажання людини, ще і за законами квантової фізики. Оскільки, той, хто вимірює імпульс атома, вступає у взаємодію з ним і змінює його стан. У растрових мікроскопах спостереження і маніпуляція єдині, як пальці на руці. Одним з найбільш багатообіцяючих і цілком реальних застосувань нанотехнології можуть виявитися нанороботи – пристрої розміром в десятки нанометрів, які самостійно маніпулюють атомами. Нанороботи будуть мати здатність самовідтворюватися, створювати з довільного органічного та неорганічного підручного матеріалу будь-які предмети. В результаті нанороботи, маніпулюючи молекулами, зможуть створити будь-який предмет або істоту.

Нанороботів поділяють на два види: 1) асемблери, здатні конструювати і самовідтворюватися; 2) дизасемблери, здатні розбирати. Дослідники провідних лабораторій світу повідомляють, що значно просунулися в створенні нанороботів. Не виключено, що першою областю, де знайдуть застосування таланти нанороботів, стане медицина.

Наноробот, введений в організм людини, зможе самостійно пересуватися по її кровоносній системі. На цьому шляху наноробот зможе виправити характеристики тканин і клітин, очистити організм від мікробів і молодих ракових клітин, а також від різних відкладень, наприклад, холестерину.

З 1970-х років на наших космічних станціях велися унікальні дослідження з біотехнології, де в умовах невагомості вирощувалися білки і синтезували особливо чисті матеріали, в тому числі напівпровідники. Створення нових матеріалів важливо - від рішення енергетичних проблем, до якісних змін в інформатиці.

Один з найбільш важливих технологічних пріоритетів - біоорганічної матеріалознавство на основі нанотехнології. Фактично наука підійшла до моделювання принципів побудови живої матерії, яка заснована на саморегуляції. Раніше саморегуляцією були наділені тільки живі організми, але нанотехнології зроблять саморегуляцію властивістю неживої матерії. Властивістю саморегуляції будуть наділені, наприклад, нанороботи. Освоєний і відзначений Нобелівською премією метод створення структур за допомогою квантових точок і є справжня саморегуляція неорганічної матерії. Це переверт в науці - створення біонічних приладів, клітинних мембран з біоорганіки, навіть біологічних органів і об'єктів, аж до, скажімо, очі, печінки, шкіри і найдосконалішого комп'ютера, яким є мозок.

Стрімкий розвиток науки призвів до того, що завдяки нанотехнології вчені від аналізу вперше переходять до синтезу, що дає нове знання і призводить до якісної зміни світу науки.

Найбільш перспективними для подальшого застосування в медицині і створення новітньої електродіагностичної апаратури з підвищеною роздільною здатністю є біонаноелектроди - електроди, виконані на базі пористої кераміки. При їх виготовленні в порах керамічної діафрагми електрода розміщують частки срібла. Паста на основі хлористого срібла ( $\text{AgCl}$ ) після розплавлення змочує срібні частки, при цьому в порах керамічної діафрагми утворюється безліч хлорсрібного мікроелектродів. Пори в пористій кераміці є складною системою сполучених між собою порожнин.

Частинки срібла електрично не пов'язані один з одним, тому вони знаходяться в різних порах. Після просочення електродів

твердим електролітом між окремими мікроелектродами виникає електрична провідність. Загальний електродний потенціал визначається сумою потенціалів мікроелектродів. У зв'язку з цим, електроди на базі пористої кераміки можна назвати поліелектродами. Завдяки спеціальній технології в пори керамічної діафрагми наносять наночастинки срібла, які мають розміри менші за 0,1 мкм.

Зі збільшенням числа мікроелектродів зменшується рівень шумів. Біонаноелектроди мають на порядок менший дрейф електродного потенціалу на постійному струмі, в кілька разів менші імпеданс, рівень власного дрейфу напруги і напруги шуму. Зі зменшенням розміру частинок срібла зменшуються ємність наноелектродів, їх опір, підвищується стабільність електродного потенціалу в часі, зменшується ступінь поляризації при впливі постійним струмом в порівнянні з відомими хлор-срібного електродом. Отже, результати електрофізіологічних досліджень будуть достовірніше, а вимірювання діагностичних показників.

### **3. Перспективні напрямки використання наночасток металів в медико-біологічній практиці**

На сьогоднішній день актуальною залишається проблема лікування гострих гнійно-запальних захворювань м'яких тканин мікробної етіології, пов'язаної з поширеністю ран, зі зростанням частки затяжних, уповільнених і хронічних форм, а також з економічними витратами на їх лікування. Серед фахівців-практиків, що займаються рановий інфекцією широко поширена думка, що аеробні або факультативно-анаеробні умовно патогенні мікроорганізми, такі як золотистий стафілокок, гнійна паличка та бета-гемолітичний стрептокок є основними причинами затримки загоєння гострих і хронічних ран. Така думка склалася на основі досліджень останніх двох десятиліть, присвячених ролі мікроорганізмів в загоєнні ран.

Процеси загоєння ран визначаються не тільки об'єктивними критеріями оцінки перебігу інфекційно-запального процесу, а й механізмами патогенетичного лікування і становлять особливий інтерес для теоретичної і практичної медицини. Серед великої кількості робіт, присвячених вивченню процесів регенерації

дефектів шкірних покривів, особливе місце відводиться експериментальним дослідженням, спрямованим на пошук ефективних засобів (антибіотики, антисептики, мазі та гелі на засадах, вуглецеві сорбенти, поліетиленоксиди, похідні целюлози та ін.) і способів для придушення розвитку патогенної мікрофлори.

Сучасні препарати, що використовуються для лікування гнійних ускладнень, повинні володіти різноспрямованою дією і поєднувати в собі регенеративну і антимікробну активність. Однак висока резистентність мікроорганізмів до використовуваних лікарських препаратів визначає необхідність комплексного дослідження і розробки нанобіокомпозитів, що володіють широким спектром біологічної активності щодо інфекційно-запального процесу.

На даний час для лікування ран різної етіології розроблено два наноструктурних ранових покриття: тришарове гідрогелеве біоактивне фуллеренвмісне і на основі нано-гель-плівки бактеріальної целюлози. Ефективність розроблених ранових покриттів досліджувалася при місцевому лікуванні гранулюючих ран після глибоких опіків в експерименті на щурах. Експериментальні дослідження показали, що застосування ранових покриттів при місцевому лікуванні гранулюючих ран після глибоких опіків попереджає ускладнений перебіг ранового процесу і скорочує терміни загоєння ран в середньому на 17,5%. Під час експериментів на лабораторних тваринах було виявлено, що в групі тварин, які отримували місцево магнітні наночастинки феррогідрита з ампіциліном, рани гоїлися в два рази швидше, ніж у тварин, які отримували тільки ампіцилін. Зменшення запальної реакції пов'язане зі збереженням антибактеріальних і протизапальних властивостей комплексу наночастинок/ампіцилін, що позитивно впливало на терміни загоєння ранових поверхонь. Досліджено також вплив наночастинок цинку в вигляді суспензії і в комплексному поєднанні з біополімером хітозаном на швидкість регенерації великих шкірних ран у експериментальних тварин. Показано, що використання суспензій наночастинок цинку в фізіологічному розчині хлориду натрію виявляється ефективним при місцевому лікуванні неінфікованих



ран. Найбільш виражене регенеративну дію відзначено у комплексного препарату наночастинок цинку на основі хітозану.

Для боротьби зі збудниками інфекційних захворювань крім використання хіміотерапевтичних засобів особливе місце займає фотодинамічна терапія, як одна з нових ефективних антимікробних методик. Основою такої терапії є фотосенсибілізатори, які являють собою специфічні речовини, які характеризуються виборчої чутливістю до певних довжинах хвиль оптичного діапазону.

На сьогоднішній день таких речовин відомо більше 1 000 і вони мають як природне, так і синтетичне походження (хлорофіли, фікобіліни, порфірини і проміжні продукти їх синтезу, деякі антибіотики, хінін, рибофлавін і ряд інших препаратів). Такі фотосенсибілізатори повинні мати наступні характеристики: висока хімічна чистота і однорідність складу; відсутність темної токсичності; висока здатність до акумуляції в тканині-мішені; швидка елімінацією з організму хворого; висока фотохімічна активність, яка характеризується високим квантовим виходом синглетного кисню; поглинання світла в довгохвильовій частині спектру (600-800 нм), в якій біологічні тканини найбільш прозорі, з високим коефіцієнтом екстинкції.

Кожна бактеріальна клітина поглинає і накопичує у великій кількості молекули фотосенсибілізуючої речовини, а більшість мікроорганізмів використовують кисень в своєму метаболічному циклі, тому з точки зору реалізації фотодинамічного ефекту не існує мікроорганізмів, стійких до цього методу. Це дає можливість використовувати фотодинамічну терапію для лікування інфекційно-запальних процесів, викликаних різними антибіотикостійкими штамми мікроорганізмів. При цьому, отриманий бактерицидний ефект не робить згубного впливу на нормальну мікрофлору організму, оскільки він лімітується зоною лазерного опромінення сенсібілізованих тканин, що дозволяє уникнути при місцевій фотодинамічній терапії побічного ефекту.

Фотодинамічні пошкодження носять локальний характер, а бактерицидний ефект лімітується зоною лазерного опромінення сенсібілізованих тканин, це дозволяє уникнути при місцевій фотодинамічній терапії побічного ефекту, спостережуваного при

застосуванні антибіотиків і антисептиків для лікування інфекційних захворювань.

Позитивні результати лікування гнійно-запальних захворювань методом фотодинамічної терапії показують високу ефективність даного методу щодо аеробних, факультативно- і облигатноанаеробних бактерій, мікроскопічних грибів.

Ряд досліджень медиків виявили вплив на штами *S.aureus*, *S.simulans*, *Dermabacter hominis* наночастинок  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  при додатковому застосуванні світлодіода з щільністю потужності світлового потоку  $31,5 \text{ мВт} / \text{см}^2$  в діапазоні довжин хвиль від 385 до 425 нм, що відповідає максимуму поглинання у видимій області світла наночастинками. Тимчасова експозиція впливу дослідних зразків на штами становила 5, 10, 15 і 30 хвилин. В результаті виявлено залежність зміни концентрації патогенної мікрофлори не тільки від часу опромінення, але і від концентрації наночастинок в суспензії.

Таким чином, аналіз даних медичних досліджень дозволяє з представленої групи металів, з виявленими антибактеріальними властивостями, виділити срібло і мідь як найбільш перспективні щодо засобів для боротьби з полірезистентними штамми мікроорганізмів. Серед різних форм використання нанорозмірних матеріалів інтерес представляють дисперсії, суспензії і золі наночастинок металів. Їх перевага полягає в порівняно вузькому розподілі за розмірами і формою і тривалому часу збереження антибактеріальної активності. Є підстави вважати, що стабільні наночастинки металів у водних дисперсіях знайдуть корисні застосування в біології та медицині.

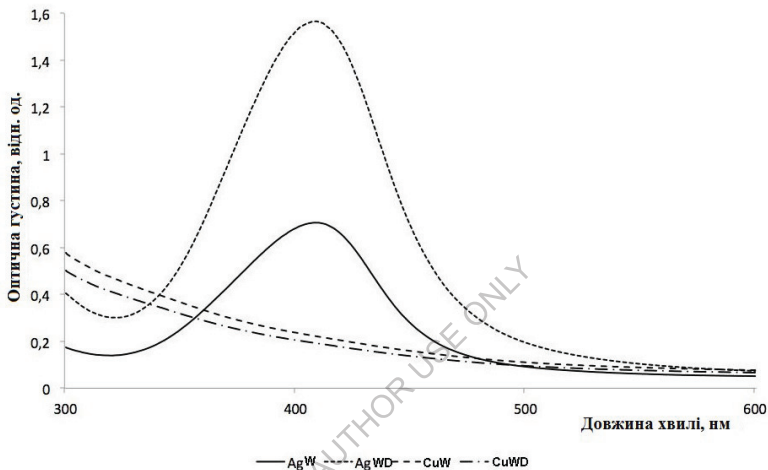
До теперішнього часу немає достатньої кількості досліджень, присвячених впливу водних дисперсій срібла і міді на клінічні штами грамнегативних і грампозитивних мікроорганізмів.

#### **4. Антимікробна фотодинамічна активність водних і водних діалізованих дисперсій наночастинок металів**

При фотодинамічній дії важливою умовою генерації активних форм кисню і вільних радикалів є збіг максимуму випромінювання лампи і максимуму поглинання фотосенсибілізатора. Для прогнозування ефективності фотодинамічного впливу з використанням досліджуваних зразків

наночастинок вимірюють оптичну щільність їх водних суспензій в робочих концентраціях.

Встановлено, що дисперсія наночастинок срібла AgW має максимум поглинання в області 410 нм (0,707 відн.од.). При цьому, оптична щільність при довжині хвилі 405 нм склала 0,702 відн. од. (рис.1.).



**Рис.1.** Спектри оптичної густини досліджуваних наночастинок.

Вимірювання дисперсії наночастинок срібла AgWD показали, що даний зразок наночастинок має максимум поглинання в спектральному регіоні 405-410 нм (1,557-1,564 відн. од.). Оптична щільність дисперсії при довжині хвилі збудження 405 нм була вище, ніж в попередньому випадку, і склала 1,557 відн. од. Отримані показники оптичної щільності відповідають паспортним даним фірми-розробника.

Спектральний аналіз дисперсії наночастинок міді CuW виявив досить широку область з високим поглинанням від 300 до 400 нм. Оптична щільність дисперсії цього зразка наночастинок при довжині хвилі 405 нм склала 0,228 відн. од. Встановлено, що наночастинок міді CuWD мають аналогічний спектр з оптичною щільністю розчину, яка рівна 0,197 відн. од. при довжині хвилі світла 405 нм.

Проведені дослідження показали, що використання обраних зразків наночастинок в поєднанні з синім (405 нм) випромінюванням може бути перспективним для антимікробної фотодинамічної дії.

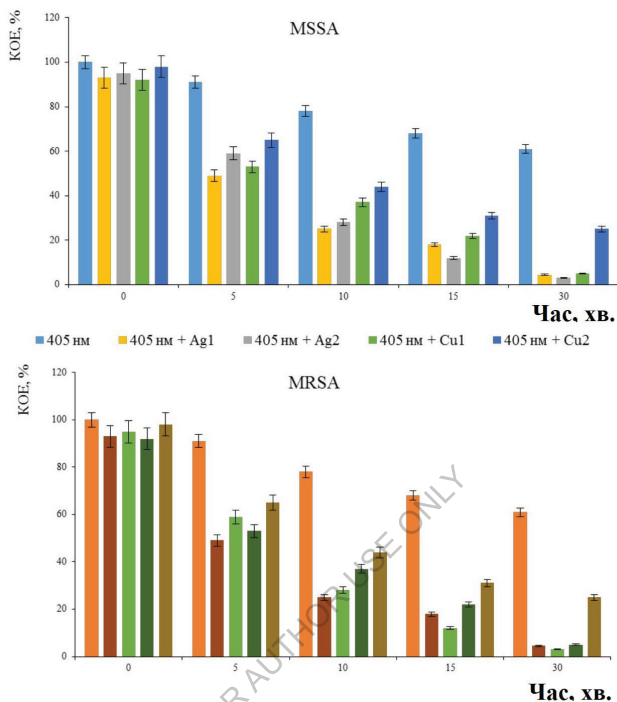
На наступному етапі досліджували дію синього (405 нм) світлодіодного випромінювання на клітини стандартного штаму *S. aureus* 209 P. Показано, що дія синім світлом не викликала істотного скорочення чисельності дослідженого мікроорганізму. Так вплив протягом 5-ти хвилин призводив до зниження КУО на 9% відносно контролю, а при часі опромінення 10 хвилин показник КУО зменшувався на 22%. Дія синього випромінювання протягом 30 хвилин скорочувала відносну чисельність досліджених бактерій на 39%.

Обробка клітин *S. aureus* 209 P водною дисперсією наночастинок срібла AgW викликала істотне посилення дії світлодіодного випромінювання. Після 5-ти хвилин експозиції чисельність бактерій скорочувалася на 41%, після 15 хвилин - на 88%, а після 30 хвилин - на 97%.

Клінічний штам золотистого стафілокока (MRSA) демонстрував велику сприйнятливість до дії світлодіодного синього випромінювання (рис.2). Експозиція світла протягом 10-15 хвилин призводила до скорочення чисельності популяції бактерій на 35-47% в порівнянні з контролем. Опромінення тривалістю 30 хвилин викликало зменшення числа КУО на 58%.

Використання водної діалізованої дисперсії наночастинок срібла AgWD забезпечувало більш виражену дію на клітини *S. aureus* 209 P протягом перших 5-10 хвилин опромінення: зменшення числа колонієутворюючі одиниці (КУО) відзначено на 51-75%. При подальшому збільшенні часу опромінення зниження чисельності відзначено на 82% після 15 хвилин і на 96% - після 30 хвилин.

Схожа динаміка зміни чисельності бактерій при використанні двох зразків водних дисперсій наночастинок срібла і опроміненні світлодіодним синім випромінюванням відзначена для метіцилінрезистентного штаму *S. aureus*. При варіюванні часу опромінення від 5 до 30 хвилин зниження числа КУО відбувалося в середньому на 60-98%.



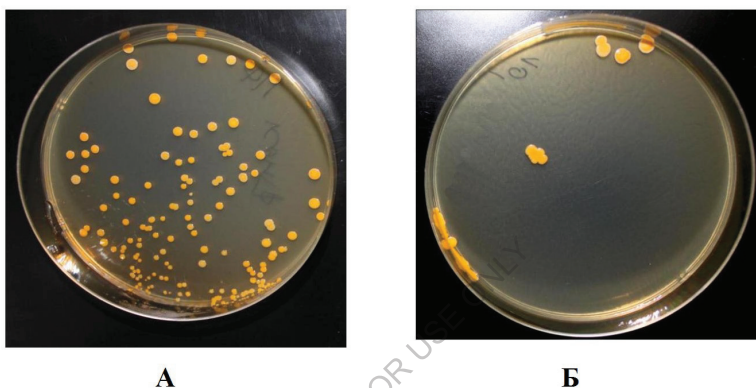
**Рис.2.** Вплив синього (405 нм) світлодіодного випромінювання і наночастинок на чисельність мікроорганізмів.

Необхідно відзначити, що скорочення числа мікроорганізмів двох досліджених штамів, клітини яких були оброблені наночастинками срібла і піддані опроміненню протягом 15-30 хвилин, не мало достовірних відмінностей між собою.

На наступному етапі було вивчено дію водних дисперсій наночастинок міді CuW на виживання бактерій *S. aureus* 209 P. Встановлено, що дані наночастинки посилюють дію синього (405 нм) випромінювання. Зниження КУО після 5 хвилин впливу відзначено на 47%, а після 30 хвилин опромінення - на 95%. Зразок наночастинок міді CuWD мав менш виражені фотодинамічні властивості. Зменшення чисельність *S. aureus* 209

Р відбувалося на 35-75% після 5-30 хвилин опромінення синім світлом.

Необхідно відзначити, що скорочення числа мікроорганізмів двох досліджених штамів, клітини яких були оброблені наночастинками срібла і піддані опроміненню протягом 15-30 хвилин, не мало достовірних відмінностей між собою.



**Рис.3.** Показники КУО *S. aureus* 209 P: А - контроль; Б - після обробки наночастинками AgW і опроміненні синім світлом 15 хвилин.

Для клінічного штаму *S. aureus* ефект посилення фотодинамічної дії синього випромінювання водними дисперсіями наночастинок міді був більш виражений. Скорочення чисельності КУО бактерій в разі використання зразка CuW показано на 44% після 5-ти хвилин опромінення, на 71% - після 10-ти хвилин, на 81% - після 15-ти хвилин і на 96% - після 30 хвилин. Використання зразка водної дисперсії наночастинок міді CuWD також викликало загибель бактеріальної популяції. Зниження чисельності мікроорганізмів відбувалося на 77% після 15-ти хвилин опромінення синім світлом і на 84% - після 30 хвилин.

Вміст стабілізатора діоктилсульфосукціонат натрію (AOT) в зразку водної дисперсії наночастинок міді був в два рази вищим, ніж в зразку водної діалізованої дисперсії, з цим, ймовірно, і

пов'язано більш ефективне зниження числа КУО досліджених мікроорганізмів.

Таким чином, в ході проведених досліджень встановлено, що найбільшу фотодинамічну активність щодо досліджених штамів проявляла водна діалізована дисперсія наночастинок срібла зразка AgWD, причому найбільш чутливим до них виявився метицилінрезистентний клінічний штам *S. aureus*. Оскільки за даними виробника відповідно до паспорта якості, термін придатності наночастинок становить до двох років з дати виготовлення, то отримані результати дозволяють розглядати водні дисперсії наночастинок срібла і міді в якості перспективних фотосенсибілізаторів для посилення ефекту дії синього випромінювання на збудників гнійно-запальних захворювань при проведенні антимікробної фотодинамічної терапії.

### **Контрольні запитання**

1. Дайте визначення термінів «біонанотехнологія», «нанобіотехнологія» і «біочіп».
2. Яким є найважливіше завдання біонанотехнології в наш час ?
3. Нанороботи і їх види.
4. Який електрод називають біонаноелектродом і як він функціонує?
5. Охарактеризуйте використання наночастинок металів в біології і медицині.
6. Що розуміють під термінами «фотосенсибілізатор» і «фотодинамічний ефект» ?
7. Охарактеризуйте антимікробну дію дисперсій наночастинок металів.

FOR AUTHOR USE ONLY



FOR AUTHOR USE ONLY

**More  
Books!**



yes  
**I want morebooks!**

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**

Kaufen Sie Ihre Bücher schnell und unkompliziert online – auf einer der am schnellsten wachsenden Buchhandelsplattformen weltweit! Dank Print-On-Demand umwelt- und ressourcenschonend produziert.

Bücher schneller online kaufen  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**



[info@omniscryptum.com](mailto:info@omniscryptum.com)  
[www.omniscryptum.com](http://www.omniscryptum.com)

OMNIScriptum



FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY