

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

## ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий ( магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

Освітня програма 172 Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі

Шифр і назва освітньої програми

на тему **ІМПУЛЬСНИЙ МАГНІТНО-ПЛАЗМОВИЙ КОМПРЕСОР ДЛЯ  
АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ ТА СТЕРИЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ**

ДРЕК.024156.01.02 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ЕКР<sub>м</sub>-24-1

  
підпис

Д. В. Козицький

Ініціали, прізвище

Керівник: к.т.н., доцент

  
підпис

В. І. Стецюк

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, доцент

  
підпис

С. К. Підченко

Ініціали, прізвище

15 грудня 2025 р.

Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інформаційних технологій*

Кафедра *телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)*

Освітній рівень *другий (магістерський)*

Галузь знань *17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації*

Спеціальність *172 – Електронні комунікації та радіотехніка*

Освітня-професійна програма *Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ТМІТ

*С. К. Підченко*  
« 1 » 09 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Козицькому Дмитру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Імпульсний магнітно-плазмовий компресор для антибактеріальної та стерилізаційної обробки матеріалів

керівник роботи Стецюк Віктор Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к. т. н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом по університету від « 25 » серпня 2025 р. № 65.

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 24.11.2025 р.

3. Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи підвищення ефективності методу стерилізації об'єктів і середовищ на основі впливу імпульсного електромагнітного випромінювання ультрафіолетового діапазону

Об'єкт дослідження процеси формування імпульсних розрядів плазмових потоків в атмосферному середовищі

Предмет дослідження джерела потужного імпульсного електромагнітного опромінення ультрафіолетового діапазону

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

1) провести аналітичний огляд існуючих рішень, здійснити класифікацію області застосування імпульсного оптичного джерела УФ випромінювання на основі магнітоплазмового компресора;

2) сформувати математичний апарат генерування широкосмугових імпульсних випромінювань ультрафіолетового діапазону;

3) здійснити моделювання процесів імпульсного електромагнітного випромінювання у магнітоплазмовому компресорі;

4) здійснити апаратну реалізацію магнітоплазмового компресора на рівні функціональної схеми.

Завдання отримав

*Дмитро Козицький*  
(підпис)

Дмитро Козицький  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник

*Віктор Стецюк*  
(підпис)

Віктор Стецюк  
(прізвище, ім'я, по батькові)



## АНОТАЦІЯ

Тема магістерської роботи: «Імпульсний магнітно-плазмовий компресор для антибактеріальної та стерилізаційної обробки матеріалів»

Автор роботи: Козицький Дмитро Володимирович

Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент Стецюк Віктор Іванович.

Пояснювальна записка: 125 сторінок, 47 рисунків, 8 таблиць, 16 джерел.

Графічна частина: слайди презентації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розряд, плазма, стерилізація, конденсатор.

*Метою магістерської роботи є підвищення ефективності методу стерилізації об'єктів і середовищ на основі впливу імпульсного електромагнітного випромінювання ультрафіолетового діапазону.*

*Об'єктом дослідження є процеси формування імпульсних розрядів плазмових потоків в атмосферному середовищі.*

*Предметом дослідження є джерела потужного імпульсного електромагнітного опромінення ультрафіолетового діапазону.*

У першому розділі розглянута бактерицидна дія ультрафіолетового випромінювання та сформульовано ряд вимог, які характеризують процес знешкодження інфекційної мікрофлори.

В другому розділі розроблена математична модель генерування широкосмугових імпульсних випромінювань оптичного діапазону на основі техніки магнітоплазмових прискорювачів заряджених частинок та модель імпульсного електромагнітного випромінювання з нелінійною залежністю електродинамічних характеристик та виконані розрахунки розподілу пробійної напруженості поля атмосфери широкосмуговим джерелом потужного ультрафіолетового випромінювання на основі плазмових розрядів

В третьому розділі на основі розробленої математичної моделі генерування широкосмугових імпульсних випромінювань джерелами потужного оптичного випромінювання у складі магнітоплазмового генератора, проведено розрахунки та аналіз енергетичних, часових і температурних процесів, побудовані часові та енергетичні залежності для реально обраного ємнісного накопичувача.

В четвертому розділі запропонована функціональна схему пристрою стерилізації на основі магнітоплазмового компресора на основі сучасної елементної бази, яка дозволила покращити характеристики в порівнянні з аналогами у 5-10 разів.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	
ВСТУП .....	7
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	13
1.1. Опис проблематики, постановка задач .....	13
1.2. Бактерицидна дія ультрафіолетового випромінювання .....	15
Висновки до розділу 1 .....	32
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ .....	33
2.1. Дослідження пробійної характеристики міжелектродного проміжку .....	33
2.2. Математична модель генерування імпульсних випромінювань оптичного діапазону .....	42
Висновки до розділу 2 .....	48
3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ НАДКОРОТКИХ ВИСОКОСТРУМОВИХ РОЗРЯДІВ .....	49
3.1. Вибір типу накопичувача енергії .....	49
3.2. Розрахунок параметрів накопичувача енергії .....	54
Висновки до розділу 3 .....	63
4. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ .....	65
4.1. Відомі найбільш вживані пристрої формування випромінювання ультрафіолетового діапазону .....	65
4.1.1. Лампи для ультрафіолетового знезаражування .....	65
4.1.2. Патентні матеріали в області техніки формування ультрафіолетового випромінювання .....	67
4.1.3. Ексімерні лазери .....	71
4.1.4. Плазмові випромінювачі .....	76
4.2. Імпульсний магнітоплазмовий компресор випромінювання ультрафіолетового діапазону.	79

4.2.1. Будова та опис конструкції магнітоплазмового випромінювача ...	79
4.2.2. Класифікація областей застосування імпульсного оптичного джерела УФ випромінювання на основі магнітоплазмового компресора .....	92
Висновки до розділу 4 .....	93
ВИСНОВКИ .....	94
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	96
Додатки .....	99
Додаток А. Слайди презентації .....	99
Додаток Б. Копія публікації .....	110

## ВСТУП

Боротьба з інфекціями та хворобами, які вони викликають, актуальна з моменту існування людської цивілізації. Відсутність розуміння механізмів спричинення захворювань, засобів діагностування та запобігання захворюванням дорого обходилася для людей. Відомі випадки [1-3] масових захворювань із летальними наслідками, джерелами яких були інфекції та бактерії. Однак, поступово, з розвитком науки, фізіології, медицини прийшло розуміння процесів і явищ, притаманних розвитку та перебігу різноманітних захворювань і патологій.

На сьогодні існують різноманітні за природою способи боротьби із збудниками інфекційних захворювань. Слід зазначити, що шляхи поширення інфекцій можуть бути достатньо різноманітні:

- повітря (респіраторні);
- вода;
- їжа;
- тактильні;
- медикаментозні (під час хірургічних втручань, стоматологія, ін'єкції, тощо).

Найбільш поширеним механізмом розповсюдження патогенних мікроорганізмів є повітряний та повітряно-крапельний методи. Особливо враховуючи те, що ми часто перебуваємо в місцях великого скупчення людей (учбові заклади, транспорт, метро, медичні заклади, театри, банківські сховища та інш.). Стерилізаційна обробка поверхонь всіх цих приміщень вкрай ускладнена. Однак, саме вчасне запобігання процесам поширення та концентрації патогенної мікрофлори є запобіжним заходом виникнення та розповсюдження різноманітних захворювань

З іншого боку, слід розглянути вимоги до методів та умов боротьби з інфекціями:

- час впливу;

- механізм впливу;
- ефективність обраного методу;
- побічні ефекти.

Спробуємо також класифікувати методи ефективного знищення хвороботворної мікрофлори. У медицині використовується термін “стерилізація” – процес повного знищення мікроорганізмів (бактерій, вірусів, грибків, спор, тощо) в повітрі, на поверхнях та предметах. Існує ще поняття “дезінфекції”, який відрізняється від стерилізації лише частковим знищенням та мінімізацією мікрофлори. В нашому випадку ми будемо розглядати *тільки* високоефективну стерилізацію. Найбільш поширеними методами стерилізації є:

- термічна обробка;
- хімічна дія;
- фізичні (електрофізичні) методи.

Термічна обробка має достатньо обмежений ореол застосування. Так, звичайно можна стерилізувати невеликі предмети (медичні інструменти, одяг), однак неможливо стерилізувати підлогу та стіни медичних закладів або місць загального користування, великі об’єми повітря та інш. Крім того, це достатньо енергетично затратний метод та ще й тривалий у часі.

Хімічні – це низькотемпературні методи, що використовують розчини хімічних речовин (альдегіди, пероксида, аміни, кислоти, тощо). Даний набір методів також має ряд недоліків: багато речовин являються шкідливими для людей і навіть токсичними; великі та постійні витрати стерилізаційних речовин (особливо для обробки великих об’ємів), велика вартість, протипоказання для обробки деяких поверхонь і речовин, велика вірогідність ініціювання непередбачуваних хімічних реакцій, що призводять до зміни фізико-хімічних і біологічних властивостей оброблювальних об’єктів та багато іншого.

Фізичні методи представлені широким спектром факторів та різноманітною природою впливу. Відомі радіаційні методи стерилізації на основі іонізуючого випромінювання ( $\gamma$ -, та рентгенівського випромінювання). Наступний метод – електрофізичний, до якого, до речі, і відноситься

ультрафіолетове випромінювання. Вище вже зазначалося, що УФ промені характеризуються значною бактерицидною стерилізаційною дією. Відомі УФ бактерицидні ртутно-кварцові лампи [ ], які широко застосовуються в медичних закладах. Недоліком таких пристроїв є їх низька ефективність та довготривалий час обробки об'єктів для отримання оптимального ефекту. Немаловажним фактором є питання утилізації, адже наявність парів ртуті та її сполук в балонах ускладнює даний процес, а при порушенні умов зберігання та утилізації катастрофічно забруднює навколишнє середовище. До фізичних методів слід віднести також імпульсні електромагнітні джерела потужного випромінювання, які характеризуються високим ступенем стерилізації [ ]. Саме цей метод обрано в якості предмету дослідження, як найбільш перспективний, особливо з погляду на його фактично миттєву дію та надзвичайну ефективність [4]. На основі плазмових джерел можливо одержання імпульсів оптичного, зокрема, потужного ультрафіолетового випромінювання. У даній роботі в якості джерела УФ випромінювання передбачається використання магнітоплазмового компресора (МПК), який є на теперішній час найбільш високоефективним джерелом імпульсної дії.

*Актуальність* роботи полягає у підвищенні ефективності стерилізаційної обробки різноманітних об'єктів, предметів і середовищ методом впливу потужних джерел імпульсів високої інтенсивності оптичного діапазону, а саме ультрафіолетового випромінювання. В ряді нормативних чинних документів [1-3] приводяться загальні питання та норми стосовно випромінювання оптичних джерел, в тому числі дії ультрафіолету. Приводяться методики визначення густини потоку енергії ультрафіолетового випромінювання, регламентуються норми і дози.

Існує також ряд патентів вітчизняного та зарубіжного видавництва [4, 5], присвячених тематиці даного дослідження. Патентний пошук вказує на достатню актуальність теми досліджень магістерської атестаційної роботи.

Відомо ряд робіт [6-13], присвячених розгляду використання високопотужних короткоімпульсних випромінювачів для обробки об'єктів

різноманітної біологічної природи. Принцип дії імпульсного електромагнітного випромінювання оптичного діапазону на біологічні об'єкти і середовища заснований на бактерицидній дії короткохвильового ультрафіолетового (УФ) випромінювання, що пагубно сказується на патогенній мікрофлорі, забезпечуючи високий ступінь стерилізації. Джерелом ультрафіолетового випромінювання обрано магнітоплазмовий компресор (МПК) [6-8], який приводиться у режим періодично повторюваних атмосферних розрядів. Результатом потужних розрядів є згустки низькотемпературної плазми, яка, в свою чергу, являється джерелом потужного випромінювання в оптичному діапазоні, зокрема в області ультрафіолетового випромінювання. Потужність імпульсу випромінювання може сягати кількох десятків мегават, причому тривалість самого імпульсу бажано, щоб була якомога менша (десятки мікросекунд – сотні наносекунд) [9-14].

За рахунок істотного збільшення потужності УФ випромінювання такі стерилізатори мають ряд переваг у порівнянні із іншими розглянутими методами:

- надкороткий час обробки об'єктів і середовищ стерилізації;
- невеликі енергетичні затрати;
- висока ефективність методу;
- можливість обробки великих площ (великі медичні палати, об'єкти та обладнання, станції метро, зерносховища, великі приміщення загального користування, театри, кафе і ресторації, тощо).
- відсутність екологічних проблем та питань утилізації.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Магістерська робота виконана відповідно до поточних та перспективних планів наукової роботи Хмельницького національного університету, кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій за тематикою дослідження та підвищення ефективності стерилізаційної обробки об'єктів та середовищ різноманітної фізичної природи методом впливу потужних джерел ультрафіолетового діапазону.

## **Мета роботи і задачі дослідження.**

*Метою* дипломної роботи є підвищення ефективності методу стерилізації об'єктів і середовищ на основі впливу імпульсного електромагнітного випромінювання ультрафіолетового діапазону.

**Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані наступні задачі:**

- 1) провести аналітичний огляд існуючих рішень, здійснити класифікацію області застосування імпульсного оптичного джерела УФ випромінювання на основі магнітоплазмового компресора;
- 2) сформувати математичний апарат генерування широкосмугових імпульсних випромінювань ультрафіолетового діапазону;
- 3) здійснити моделювання процесів імпульсного електромагнітного випромінювання у магнітоплазмовому компресорі;
- 4) здійснити апаратну реалізацію магнітоплазмового компресора на рівні функціональної схеми.

**Об'єктом дослідження** є процеси формування імпульсних розрядів плазмових потоків в атмосферному середовищі.

**Предметом дослідження** є джерела потужного імпульсного електромагнітного опромінення ультрафіолетового діапазону.

**Методи дослідження.** Дослідження базуються на загальних положеннях математичного та імітаційному моделюванні. Теоретичні дослідження проводилися з використанням комп'ютерних методів аналізу імпульсних електромагнітних джерел випромінювання. Експериментальні дослідження проведені з використанням теорії планування експерименту, теорії вимірів та обробки результатів експерименту.

## **Наукова новизна отриманих результатів.**

Здійснено класифікацію області застосування імпульсного оптичного джерела УФ випромінювання на основі магнітоплазмового компресора. Створено математичну модель генерування широкосмугових імпульсних випромінювань ультрафіолетового діапазону. В рамках поставлених задач,

удосконалено методи моделювання імпульсних електромагнітного джерел випромінювання оптичного діапазону та їх дію на середовища і об'єкти. Запропоновано унікальну схеми апаратної реалізації магнітоплазмового компресора.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Робота пройшла апробацію: публікація у міжнародному науковому журналі “Застосування імпульсних магнітно-плазмових компресорів для антибактеріальної та стерилізаційної обробки / В. І. Стецюк, Д. В. Козицький // The 13th International scientific and practical conference “Innovative directions for improving science, research and practice”. November 25-28, 2025. – Krakow, Poland. – 2025. – р. 123-130. ISBN: 979-8-90070-300-8. DOI: 10.46299/ISG.2025.2.13.”

# 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1. Опис проблематики, постановка задач.

На сьогодні існують як хімічні, так і фізичні методи боротьби зі збудниками інфекційних захворювань, що можуть перебувати у повітрі, на поверхнях предметів або всередині приміщень. Основні вимоги до методів, спрямованих на знищення інфекційної мікрофлори, включають [1-3]:

- високу ефективність (зменшення кількості колоній мікроорганізмів у сто і більше разів, тобто до рівня стерилізації);
- достатню тривалість обробки;
- відсутність шкідливих побічних ефектів.

Відомі радіаційні методи стерилізації на основі іонізуючого випромінювання (рентгенівського чи гамма-випромінювання) викликають глибокі зміни у хімічній структурі об'єктів обробки та супроводжуються утворенням вторинних хімічних сполук із вираженими біологічними властивостями. Термічні методи, зокрема ті, що передбачають нагрівання за допомогою мікрохвильового опромінення, вирізняються високою енергоємністю, потребою у складному й дорогому обладнанні та не завжди забезпечують необхідний рівень деконтамінації.

Хімічні методи та обладнання для їх реалізації мають суттєвий недолік – потенційну небезпеку, пов'язану з можливістю запуску небажаних хімічних реакцій, що змінюють фізико-хімічні та біологічні властивості оброблюваних матеріалів.

Високі перспективи ефективної стерилізації відкриває електрофізичний підхід, оснований на використанні ультрафіолетового (УФ) випромінювання, яке має потужну бактерицидну дію. На практиці застосовуються УФ-бактерицидні ртутно-кварцові лампи, що використовуються у медичних і фармацевтичних закладах. Водночас їх ефективність є недостатньою, що вимагає тривалої обробки приміщень (не менше 6 годин). Крім того, наявність

ртуті та її сполук у лампах створює додаткові ризики та ускладнює утилізацію таких пристроїв.

Особливе значення мають імпульсні процеси, коли енергія виділяється протягом надкоротких проміжків часу. Вони забезпечують виникнення специфічних реакцій у фізичних та біологічних об'єктах, які не спостерігаються при безперервному опроміненні. Генерація імпульсного електромагнітного випромінювання є одним із ключових напрямів сучасної радіоелектроніки, що отримав назву “мегаелектроніка”. Імпульсна потужність таких джерел може досягати величин порядку гігават.

Джерела імпульсного електромагнітного випромінювання гігаватного рівня характеризуються значною біологічною дією [3]. Залежно від умов, вплив може бути як позитивним (стимуляція життєвих процесів, ріст клітин, підвищення резистентності – так зване вітальне випромінювання), так і різко руйнівним – із вираженим стерилізуючим ефектом, що забезпечує знищення патогенних мікроорганізмів.

Механізми взаємодії імпульсного випромінювання з об'єктами різної природи залежать від амплітудно-часових параметрів імпульсів. Характерною є тенденція: зі зростанням пікової потужності необхідна інтегральна доза опромінення, що забезпечує потрібний ефект, зменшується. Особливо виразний вплив спостерігається при тривалостях імпульсів, коротших за час теплової релаксації середовища. У таких умовах виникають нетипові та високоефективні механізми дії.

Для дослідження імпульсних ефектів необхідні джерела, що забезпечують високі рівні імпульсної потужності та формують електромагнітні поля, здатні викликати біологічні реакції. Такі джерела базуються на використанні сильнострумових прискорювачів релятивістських електронних пучків і плазми. Залежно від типу електродинамічної системи можуть генеруватися вузькосмугові НВЧ-радіоімпульси або короткі надширокосмугові несинусоїдальні імпульси. Плазмові джерела також дають можливість генерувати імпульси в оптичному діапазоні, включаючи ультрафіолет.

У даній роботі як джерело УФ-випромінювання пропонується використання магнітоплазмового компресора (МПК), який на сьогодні є одним із найбільш ефективних джерел імпульсної дії.

## **1.2. Бактерицидна дія ультрафіолетового випромінювання.**

Відомі [1, 2] різноманітні за типом впливу (хімічні, фізичні) способи нейтралізації збудників інфекційних захворювань, які можуть перебувати в повітрі, воді на поверхнях предметів, тощо. Процес знешкодження інфекційної мікрофлори характеризується рядом вимог:

- висока ефективність процесу обробки (знезараження, стерилізація, тощо);
- тривалість часу обробки (знаходиться в досить широких межах, в залежності від методу боротьби);
- відсутність побічних негативних ефектів.

Відомі радіаційні методи стерилізації, що використовують різноманітні іонізуючі випромінювання (рентгенівське, гама-випромінювання) викликають глибокі об'ємні модифікації хімічної структури оброблювальних об'єктів і призводять до утворення побічних хімічних сполук, що володіють специфічними біологічними властивостями. Термічні методи обробки об'єктів, що передбачають нагрівання оброблювальних об'єктів різним шляхом, наприклад мікрохвильовим опромінюванням. Термічні методи в їх різних модифікаціях є вельми енергоємними, потребують обладнання високої вартості і не завжди забезпечують необхідний рівень деконтамінації оброблювальних об'єктів. Крім того не всі предмети, а особливо поверхні можливо інтенсивно нагрівати. Недоліком відомих способів і пристроїв, як і будь-яких інших різновидів хімічних методів та пристроїв для їх здійснення, полягає в потенціальній небезпеці, оскільки при цьому можуть ініціюватися різноманітні хімічні реакції, що призводять до зміни фізико-хімічних і біологічних властивостей оброблювальних об'єктів.

В цьому плані, достатньо перспективно виглядають методи ультрафіолетового (УФ) бактерицидного знешкодження інфекційної мікрофлори. Ультрафіолетові методи обробки повітряного середовища проводяться вже достатньо давно за допомогою обладнання із ультрафіолетовим діапазоном випромінювання, принцип дії якого оснований на пропусканні електричного розряду через розріджений газ (включаючи пари ртуті), який перебуває усередині герметичного корпусу, у результаті чого відбувається випромінювання. Прикладом такого обладнання є бактерицидні лампи, які являють собою штучне джерело випромінювання зі спектром від 205 до 315 нм. Найбільше поширення, завдяки високоефективному перетворенню електричної енергії у випромінювання, одержали розрядні ртутні лампи низького тиску, у яких процес електричного розряду в аргонно-ртутній суміші переходить у випромінювання з довжиною хвилі 253,7 нм. Ці лампи мають великий термін служби – від 4000 до 7000 годин. Відомі ртутні лампи високого тиску, які при невеликих габаритних розмірах мають велику одиничну потужність – від 100 до 1000 Вт, що дозволяє в окремих випадках зменшити число опромінювачів у бактерицидній установці. З іншого боку, вони мало економічні, мають низьку бактерицидну ефективність при терміні служби, в 10 разів менший в порівнянні з лампами низького тиску, і тому не знайшли широкого застосування.

Для більш раціонального використання на практиці бактерицидних ламп їх доцільно вбудовувати в бактерицидні опромінювачі, які представляють собою електротехнічний пристрій, який складається із самої УФ лампи, пускорегулюючого апарату, відбивної арматури і ряду допоміжних елементів. За конструктивним виконанням опромінювачі підрозділяються на три групи: відкриті, комбіновані та закриті. У відкритих опромінювачах прямий бактерицидний потік охоплює широку зону в просторі аж до тілесного кута. Вони призначаються для процесу знезаражування приміщень тільки у відсутності людей або при їхньому короткочасному перебуванні. У закритих опромінювачах, їх іноді називають рециркуляторами, лампи розташовуються в невеликому замкненому корпусі опромінювача і бактерицидний потік не має

виходу за межі корпусу, тому опромінювачі можуть застосовуватися, коли в приміщенні перебувають люди. Енергія бактерицидного потоку дезактивує більшість вірусів і бактерій, що попадають у внутрішній блок разом з повітряним потоком. У корпусі опромінювача передбачені дифузори, через які за допомогою вбудованого вентилятора повітря надходить усередину приладу, де попадає під джерело УФ випромінювання в замкненому просторі внутрішнього блоку, після чого вертається в приміщення. Комбіновані опромінювачі зазвичай забезпечуються двома бактерицидними лампами, розділеними між собою екраном так, щоб потік від однієї лампи направлявся тільки в нижню зону приміщення, від іншої – у верхню зону. Лампи можуть включатися разом і окремо. Бактерицидна установка містить у собі групу бактерицидних опромінювачів.

Тривалість роботи бактерицидної установки, при якій досягається необхідний рівень бактерицидної ефективності, різна залежно від типу опромінювача: для закритих опромінювачів від 1 до 2 годин і більше; для відкритих і комбінованих від 0,25 до 0,5 години і більше; для систем приточно-витяжної вентиляції 1 година й більше.

Робота бактерицидних ламп може супроводжуватися виділенням озону. Наявність озону в повітряному середовищі у високих концентраціях небезпечна для здоров'я людини, тому приміщення, де розміщуються установки, повинні провітрюватися системами загальнообмінної приточно-витяжної вентиляції.

Застосування ультрафіолетової енергії стає усе більш актуальним, оскільки є одним із головних методів інактивації вірусів, бактерій і грибків. Під інактивацією мікроорганізмів розуміють втрату їх здатності до розмноження після стерилізації або дезінфекції.

Бактерицидною дією володіє ультрафіолетове випромінювання з діапазоном довжин хвиль від 205 до 315 нм, воно викликає деструктивно-фотохімічне модифіковане ушкодження ДНК клітинного ядра мікроорганізму. Зміни в ДНК мікроорганізмів накопичуються та призводять до затримки темпів їх розмноження і подальшому вимиранню в першому та наступних поколіннях. У результаті ряду спостережень було відзначено, що вплив енергії в діапазоні

спектру UVC найбільш ефективний з бактерицидної точки зору при довжині хвилі в 254 нм.

Таблиця 1.1 – Види ультрафіолетового випромінювання

Найменування	Абревіатура	Довжина хвилі, нм	Кількість енергії на фотон, еВ
Близьке	NUV	400-300	3,10-4,13
Середнє	MUV	300-200	4,13-6,20
Далеке	FUV	200-122	6,20-10,2
Екстремальне	EUV, XUV	121-10	10,2-124
Вакуумне	VUV	200-10	6,20-124
Ультрафіолет А (довгохвильовий діапазон)	UVA	400-315	3,10-3,94
Ультрафіолет В (середній діапазон)	UVB	315-280	3,94-4,43
Ультрафіолет С (короткохвильовий, герміцидний діапазон)	UVC	280-100	4,43-12,4

Живі мікробні клітини по різному реагують на ультрафіолетове випромінювання залежно від довжин хвиль [2].



Рисунок 1.1 – Пряма дія ультрафіолетового випромінювання на живі тканини

Таблиця 1.2 – Ступінь сприйнятливості мікроорганізмів до спектру ультрафіолетового діапазону

Більш сприйнятливі	Група мікроорганізмів	Представник групи
	Вегетативні бактерії	Стафілокок
		Стрептокок
		Кишкова паличка
		Паличка синьогнійна
		Серрація марцесценс
	Мікобактерії	Мікобактерія туберкульозу (паличка Коха)
		Мікобактерія бичачого типу
		Мікобактерія лепри (паличка Гансена)
	Спори бактерій	Сибірська виразка (паличка сибірки)
		Бацила мозкова (Цереус)
Сінна паличка		
Менш сприйнятливі	Грибкові спори	Аспергіл різнокольоровий (висівкоподібний)
		Пеніцил золотистий
		Чорна цвіль (стахіботрія)

Стафілокок або золотистий стафілокок (*Staphylococcus aureus*) – це вид грампозитивних бактерій, який є найбільш патогенним представником свого роду. Він може викликати широкий спектр захворювань, від легких шкірних інфекцій до небезпечних станів, таких як пневмонія, ендокардит і остеомієліт. Це бактерії круглої форми (коки), які під мікроскопом зазвичай утворюють скупчення, що нагадують грона винограду (рис. 1.2).

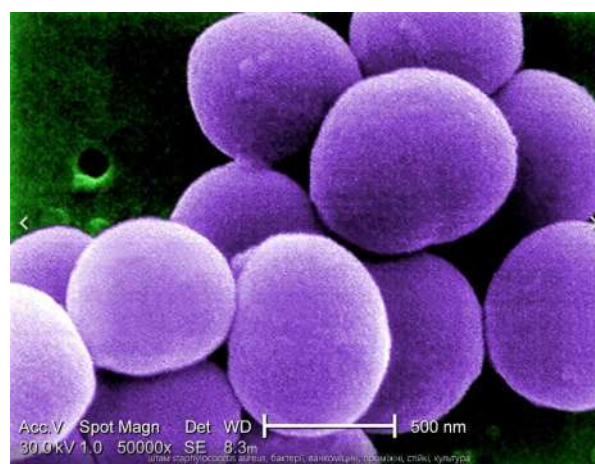
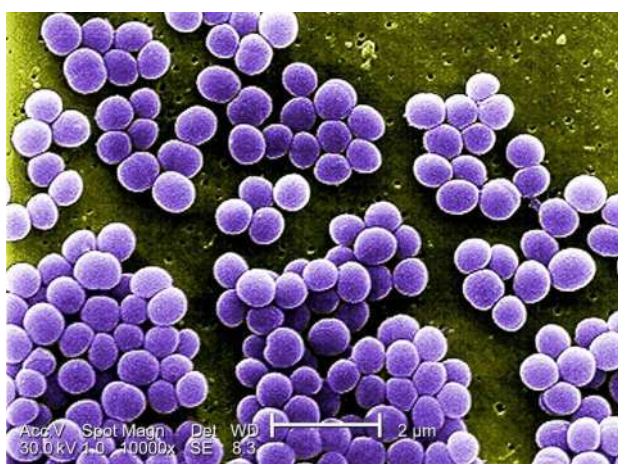


Рисунок 1.2 – Стафілокок (різні ступені збільшення мікроскопу)

Золотистий стафілокок є умовно-патогенним мікроорганізмом і часто мешкає на шкірі та слизових оболонках людини (особливо в носовій порожнині) без заподіяння шкоди. Приблизно у 20% людей є постійним жителем.

Стрептокок (*Streptococcus progenies*) – це грампозитивна бактерія, яка викликає безліч захворювань, включаючи ангіну (фарингіт), скарлатину, імпетиго і пневмонію, утворюючи ланцюжки коків і викликаючи бета-гемоліз еритроцитів (рис. 1.3); хоча часто мешкає в горлі та на шкірі без симптомів, може призвести до серйозних інвазивних інфекцій при ослабленні імунітету, але легко лікується антибіотиками. Тип: аеробний, утворює ланцюжки, здатний до гемолізу: повністю руйнує еритроцити (бета-гемоліз). Незважаючи на свою поширеність, *Streptococcus pyogenes* є важливим патогеном, який потребує своєчасного лікування для запобігання серйозним наслідкам, особливо у дітей.

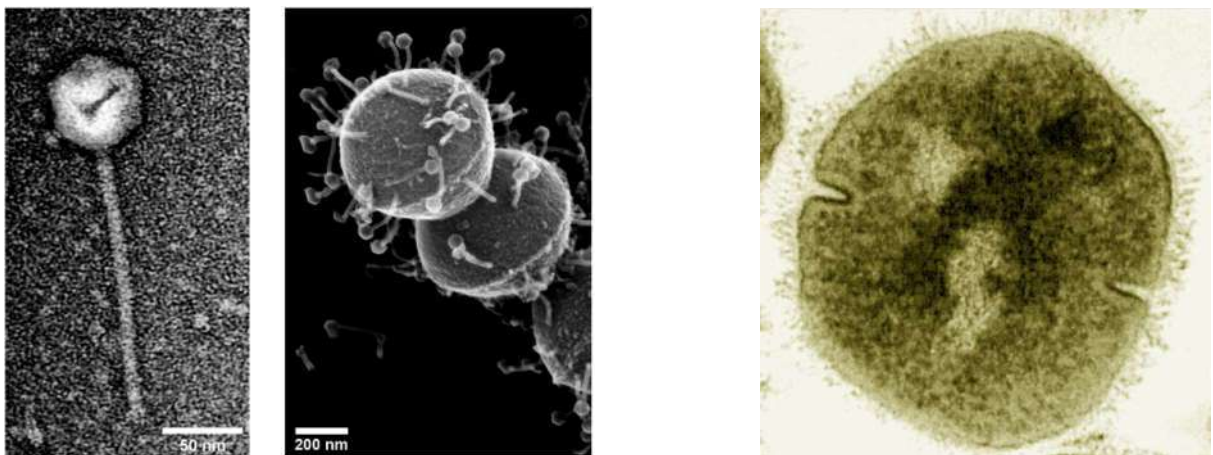


Рисунок 1.3 – Стрептокок

Кишкова паличка (*Escherichia coli*) – це грам-негативна паличкоподібна бактерія, що є частиною нормальної кишкової флори теплокровних організмів, синтезує вітамін К і допомагає травленню (рис. 1.4). Більшість штамів є нешкідливими, проте серотип O157:H7 може викликати важкі харчові отруєння у людей і тварин і можуть викликати харчові отруєння, інфекції сечовивідних шляхів, септичний шок та менінгіт. Її використовують як модель у біології та як індикатор фекального забруднення води й їжі, оскільки вона є одним із найбільш вивчених мікроорганізмів.

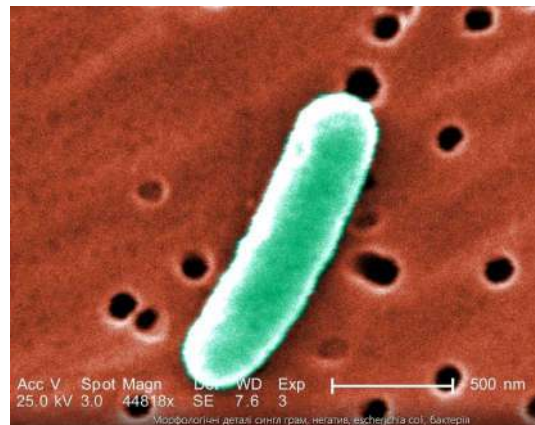
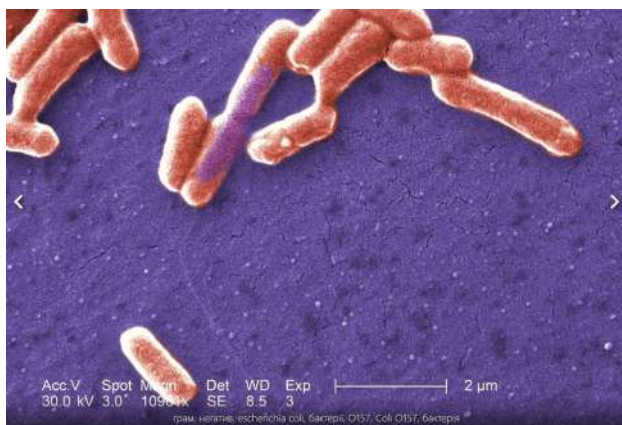


Рисунок 1.4 – Кишкова паличка

Паличка синьогнійна (*Pseudomonas aeruginosa*) – це поширена грам-негативна, аеробна бактерія, яка є опортуністичним патогеном, що може спричинити серйозні інфекції, особливо у людей з ослабленим імунітетом. Вона відома своєю стійкістю до багатьох антибіотиків (рис. 1.5).

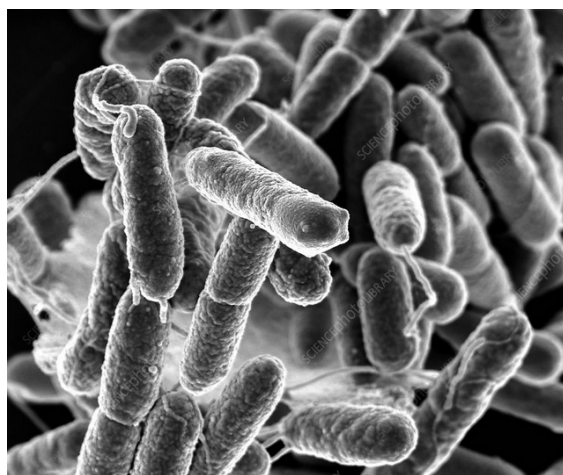


Рисунок 1.5 – Паличка синьогнійна

Бактерія широко поширена в природному середовищі, зокрема в ґрунті, воді та рослинах. Вона процвітає у вологих місцях і часто колонізує поверхні в лікарнях, такі як раковини, медичне обладнання (катетери, апарати штучної вентиляції легень) та навіть розчини антисептиків. Люди зі здоровою імунною системою рідко хворіють на серйозні інфекції, спричинені паличкою синьогнійною.

Симптоми залежать від місця локалізації інфекції: шкіра/рани: почервоніння, набряк, біль, утворення гною з характерним синьо-зеленим кольором (через пігмент піоціанін) та солодкуватим запахом. Може спричиняти наступні захворювання:

- легені (пневмонія): кашель, лихоманка, озноб, задишка, біль у грудях;
- вуха: біль, свербіж, виділення рідини з вуха, зниження слуху;
- сечовивідні шляхи: часте або болісне сечовипускання, біль в області таза;
- кров (сепсис): висока температура, озноб, втома, низький кров'яний тиск, біль у м'язах і суглобах.

Серрація марцесценс (*Serratia marcescens*) – це вид грам-негативних паличкоподібних бактерій із родини Yersiniaceae (рис. 1.6). Вони є факультативними анаеробами і широко поширені в ґрунті, воді та рослинах.

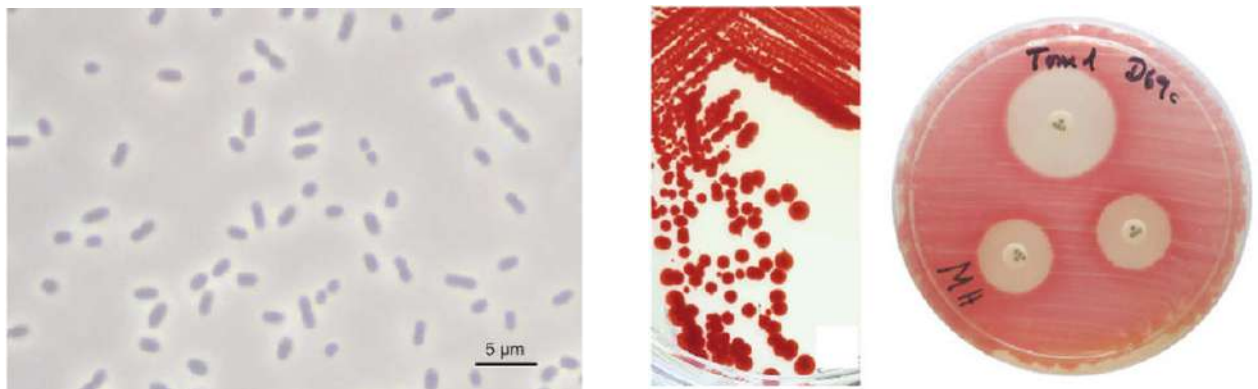


Рисунок 1.6 – Серрація марцесценс

Пігментація: ці бактерії відомі своєю здатністю виробляти характерний червоний пігмент під назвою продигіозин (prodigiosin), особливо при кімнатній температурі. Саме цей пігмент часто є причиною появи рожевого або червоного нальоту у вологих місцях, наприклад, у душі чи на зубній щітці. Патогенність: Серрація марцесценс marcescens вважалася нешкідливим мікроорганізмом, але зараз вона визнана важливим умовно-патогенним мікробом. Вона є частою причиною внутрішньолікарняних (нозокоміальних) інфекцій, особливо у пацієнтів з ослабленим імунітетом або тих, хто перебуває у відділеннях

інтенсивної терапії. Вона може викликати різноманітні інфекції, зокрема: інфекції сечовивідних шляхів, пневмонію, бактеріємію (присутність бактерій у крові), ранові інфекції, очні інфекції, такі як кератит або ендoftальміт.

Мікобактерія туберкульозу (*паличка Коха* або *Mycobacterium tuberculosis*) – основним збудником туберкульозу – серйозного інфекційного захворювання, яке найчастіше вражає легені, але може уражати й інші органи та системи організму (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Мікобактерія туберкульозу

Морфологія: тонка, нерухома, аеробна (потребує кисню) паличкоподібна бактерія. Ключовою особливістю є її товста, воскоподібна клітинна стінка, багата на миколові кислоти. Ця структура робить бактерію стійкою до стандартних методів фарбування та дезінфекції. Для її виявлення використовують спеціальний метод фарбування за Цілем–Нільсеном, при якому бактерія забарвлюється в яскраво-червоний колір. Бактерія дуже повільно росте на поживних середовищах, час генерації становить близько 20 годин, тому лабораторне культивування та ідентифікація можуть займати кілька тижнів. Воскова оболонка також забезпечує високу резистентність до фізичних та хімічних факторів. Вона може зберігати життєздатність при низьких температурах протягом багатьох років, але гине при кип'ятінні за кілька хвилин. Фактори патогенності: Вірулентні штами містять так званий корд-фактор (гліколіпід), який сприяє склеюванню бактерій та їх росту у вигляді джгутів, а також захищає від фагоцитозу. Основним шляхом передачі є

повітряний (аерогенний). Інфікування відбувається, коли людина, хвора на активну (відкриту) форму легеневого туберкульозу, кашляє, чхає або розмовляє, виділяючи мікобактерії у повітря.

Мікобактерія бичачого типу (*Mycobacterium bovis*) – це бактерія, яка є збудником туберкульозу великої рогатої худоби (бичачого туберкульозу). Вона також може інфікувати інших ссавців, включаючи людину, і входить до комплексу *Mycobacterium tuberculosis* (рис. 1.8).

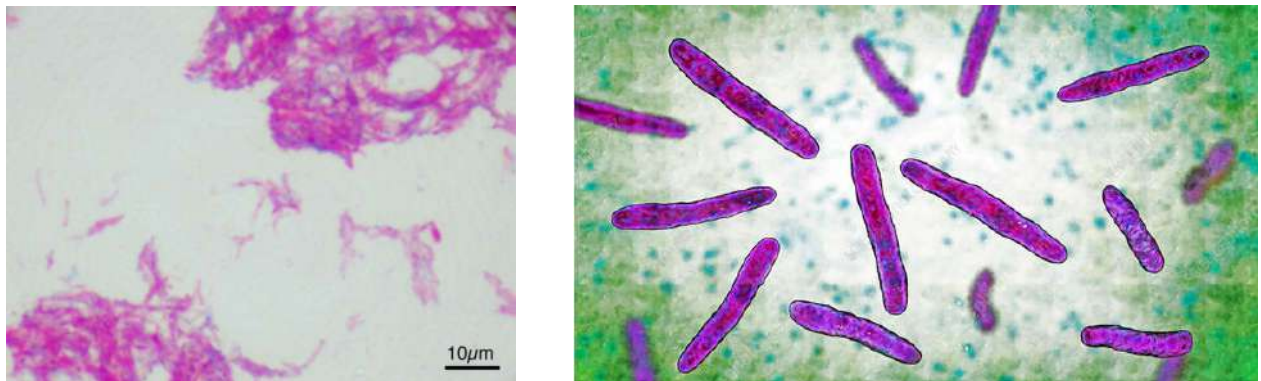


Рисунок 1.8 – Мікобактерія бичачого типу

Морфологія: нерухомі, аеробні (потребують кисню), кислотостійкі палички, які не утворюють спор чи капсул. Кислотостійкість обумовлена високим вмістом міколових кислот у клітинній стінці. Росте повільно, час генерації становить 16–20 годин. Для культивування в лабораторних умовах потрібні спеціальні поживні середовища, збагачені піруватом, і оптимальна температура близько 37°C. Бактерія має високу стійкість у навколишньому середовищі завдяки унікальній клітинній стінці і може витримувати висихання протягом декількох тижнів. Основний хазяїн: велика рогата худоба, а також олені, бізони, кози, свині та деякі дикі м'ясоїдні тварини. У людей викликає туберкульоз, який може вражати легені, лімфатичні вузли, кістки, органи травлення та інші частини тіла. Симптоми схожі на туберкульоз, спричинений мікобактеріями бичачого типу (хронічний кашель, лихоманка, нічна пітливість, втрата ваги).

Мікобактерія лепри (*паличка Гансена, Mycobacterium leprae*) – обов'язковий внутрішньоклітинний патоген, аеробна, кислотостійка бактерія паличкоподібної форми, яка є збудником лепри (прокази) (рис. 1.9).

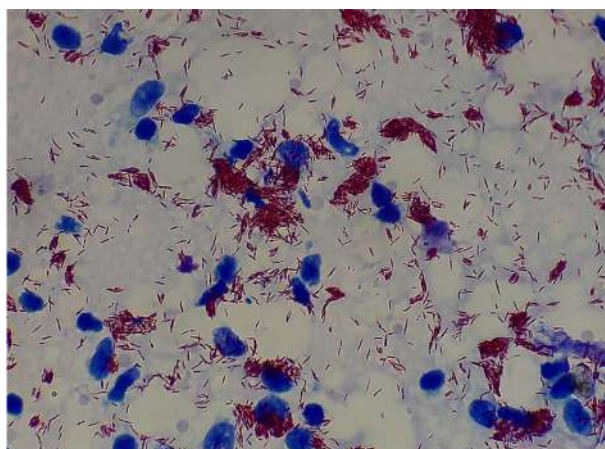


Рисунок 1.9 – Мікобактерія лепри

Морфологія: бактерія має форму прямої або злегка вигнутої палички розміром від 1 до 8 мкм у довжину та близько 0,3 мкм у діаметрі. Часто зустрічається в уражених тканинах у вигляді скупчень, які називаються "глобі" (globi), або розташовуються паралельними рядами. Клітинна стінка: має характерне товсте воскове покриття з міколових кислот, що робить її стійкою до традиційного фарбування за Грамом (хоча генетично вона є грампозитивною). Для її візуалізації використовують спеціальні методи фарбування, такі як метод Циля-Нільсена зі зниженою концентрацією кислоти або метод Файта-Фарако. Метаболізм та ріст: розмножується дуже повільно, час генерації (поділу) становить приблизно 12-14 днів. Оптимальна температура для росту – від 27 до 30 °С, що пояснює її тропізм до прохолодніших ділянок тіла людини, таких як шкіра, периферичні нерви та слизові оболонки носа. Патогенність: в основному інфікує макрофаги шкіри та шванівські клітини периферичних нервів, що призводить до пошкодження нервів, втрати чутливості та, у важких випадках, деформацій.

Сибірська виразка (*паличка сибірки, Bacillus anthracis*) – це велика, грампозитивна, паличкоподібна бактерія, яка є збудником сибірки (або

антраксу), небезпечного інфекційного захворювання, що вражає як тварин, так і людей. Вона відома своєю здатністю утворювати стійкі ендоспори, які можуть виживати в ґрунті протягом багатьох десятиліть (рис. 1.10).

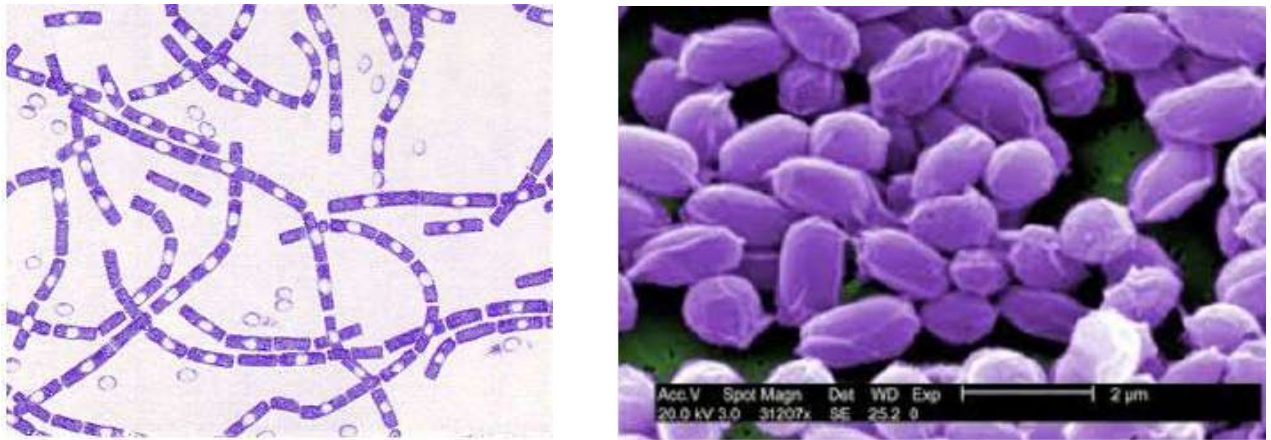


Рисунок 1.10 – Сибірська виразка

Морфологія: бактерії мають форму паличок із тупими кінцями, розміром приблизно 1 на 4 мікрметри. Під мікроскопом вони часто розташовуються ланцюжками, що нагадують "залізничні вагони". У зовнішньому середовищі (наприклад, у ґрунті), а не в живих тканинах, бактерія переходить у форму ендоспори. Ці спори мають високу стійкість до несприятливих умов, включаючи ультрафіолетове світло, високі температури та дезінфекцію. У вірулентній (патогенній) формі бактерія оточена захисною капсулою, яка допомагає їй уникати імунної відповіді хазяїна, перешкоджаючи фагоцитозу. Патогенність: здатність викликати захворювання (патогенність) зумовлена наявністю двох плазмід (pXO1 і pXO2), які кодують специфічні токсини та капсулу відповідно. Природним резервуаром є ґрунт по всьому світу, особливо в районах з нейтральним або лужним рН, багатих на кальцій. Люди зазвичай заражаються через контакт із хворими тваринами або контамінованими продуктами тваринного походження (вовна, шкіра, м'ясо). Передача від людини до людини не відбувається. Основні форми захворювання залежно від шляху проникнення спор в організм:

- шкірна: найпоширеніша форма (до 95% випадків), виникає при потраплянні спор у поріз чи подряпину на шкірі. Характеризується появою безболісної виразки з чорним центром (есхарою);

- легенева (інгаляційна): виникає внаслідок вдихання спор. Це найсерйозніша форма, яка часто є смертельною;

- шлунково-кишкова: виникає при вживанні зараженого, недостатньо термічно обробленого м'яса.

Через високу стійкість спор та летальність легеневої форми, Сибірська виразка розглядається як потенційний агент біотероризму.

Бацила мозкова (Цереус, *Bacillus cereus*) – це широко поширена грампозитивна, факультативно анаеробна паличкоподібна бактерія, відома як часта причина харчових отруєнь. Бактерії мають форму прямих або злегка вигнутих паличок із квадратними кінцями, часто розташовуються поодиноці або короткими ланцюжками (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Бацила мозкова

Вона здатна утворювати стійкі до високих температур ендоспори, що дозволяє виживати при звичайній термообробці продуктів. Середовище проживання: повсюдно зустрічається у навколишньому середовищі, будучи частиною природної мікрофлори ґрунту та рослинності. Можуть забруднювати сирі, сушені та оброблені харчові продукти, включаючи рис, молочні продукти та м'ясо. Патогенність: бактерія викликає два типи шлунково-кишкових захворювань (блювотний та діарейний синдроми) шляхом вироблення різних

токсинів. Блювотний токсин (цереулід) термостабільен викликає блювання та нудоту через 1-6 годин після вживання зараженої їжі. Діарейний токсин термолабільен призводить до діареї та спазмів у животі, зазвичай через 6-12 годин після інфікування.

Сінна паличка (*Bacillus subtilis*) – це грампозитивна, спороутворююча, паличкоподібна, аеробна бактерія, широко поширена в ґрунті і відома своєю неймовірною стійкістю до екстремальних умов завдяки утворенню ендоспор, що робить її безпечною для людини, але корисною як пробіотик і біопестицид, що виробляє антибіо. Морфологія: паличкоподібна форма (3-5 мкм), покрита кількома джгутиками (перитрих), рухлива, утворює овальні ендоспори (рис. 1.12).

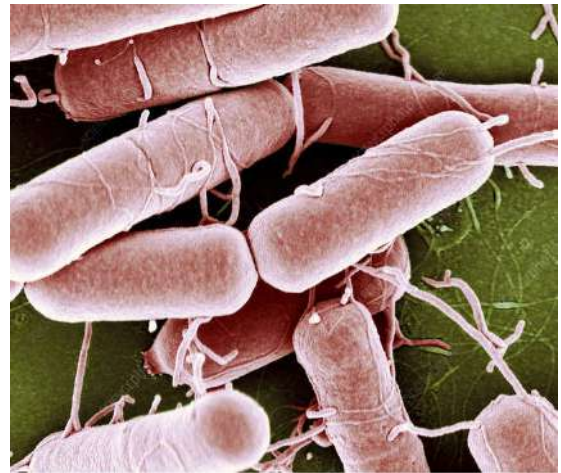
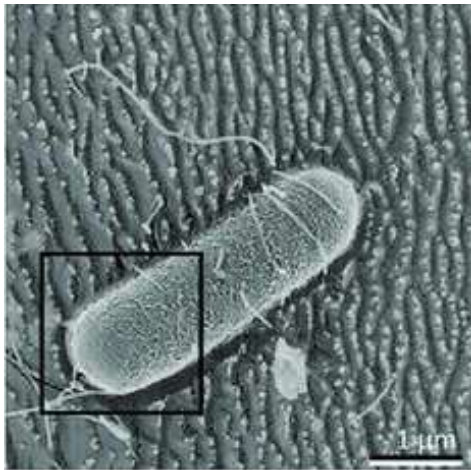


Рисунок 1.12 – Сінна паличка

Стійкість: висока стійкість до високих температур (до кип'ятіння), морозу (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), висушування та хімічних речовин завдяки суперечкам. Метаболізм: хемоорганогетеротроф, розкладає крохмаль, глікоген та білки, амоніфікує їх. Поширення: ґрунт, вода, повітря, кишечник тварин та людини. Властивості: виробляє антибіотики (понад 25 видів), ферменти (амілази, протеази), не патогенні для людини. Ключова особливість: здатність до ендоспороутворення дозволяє їй "переживати" несприятливі умови та ставати активною при їх поліпшенні, вивільняючи біологічно активні речовини.

Аспергіл різнокольоровий висівкоподібний, (*Aspergillus versicolor*) – це повільно зростаючий вид нитчастих цвілевих грибів, який широко поширений у навколишньому середовищі і часто зустрічається у вологих приміщеннях та на харчових продуктах. Зовнішній вигляд (макроскопічна морфологія): колонії (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Аспергіл різнокольоровий висівкоподібний

Аспергіл різнокольоровий на живильних середовищах або поверхнях может сильно відрізнятися за кольором (свою назву він отримав через здатність утворювати колонії різноманітних кольорів.). Спочатку вони білі, але в міру дозрівання можуть набувати жовтих, помаранчевих, зелених, рожевих або тілесних відтінків. Колонії мають замшеву текстуру і часто мають характерний затхлий, землістий запах, властивий цвілим будинкам. Під мікроскопом видно септовані гіфи (розділені перегородками) та конідієносці (стебла) завдовжки від 120 до 700 мкм. На їх вершинах розташовані невеликі везикули (здуття), покриті бісеріальними (дворядними) конідіогенними клітинами (метулами та фіалідами), які виробляють кулясті конідії (спори) діаметром 2,5-3 мкм. Живлення: грибок є ксерофільним, тобто може рости в умовах з дуже низькою активністю води (сухістю). Він стійкий до лужних умов. Його часто знаходять у ґрунті, органічних речовинах, що розкладаються, а в приміщеннях – на пошкоджених водою будівельних матеріалах, шпалерах, килимах і в системах кондиціонування. Зростання: це мезофіл, оптимальна температура зростання якого становить близько 27°C, але може рости в діапазоні від 9 до 39°C. Є

умовно-патогенним мікроорганізмом (опортуністичним патогеном) і може викликати захворювання у людей, особливо у осіб з ослабленим імунітетом. Мікотоксини: Він є основним продуцентом гепатотоксичного та канцерогенного мікотоксину стерігматоцистину (*sterigmatocystin*). Стеригматоцистин структурно схожий на афлатоксин В і вважається потенційним канцерогеном для печінки та нирок людини. Захворювання: дія може викликати подразнення очей, носа та горла. Грибок може бути причиною алергічних реакцій, загострення астми, легеневого аспергільозу, оніхомікозу (грибок нігтів), отиту та шкірних інфекцій.

Пеніцил золотистий (*Penicillium chrysogenum*) – це вид цвілевих грибів, який має велике медичне та історичне значення як основне джерело антибіотика пеніциліну. Зазвичай утворює колонії синьо-зеленого чи золотистого кольору різних субстратах (рис. 1.14).

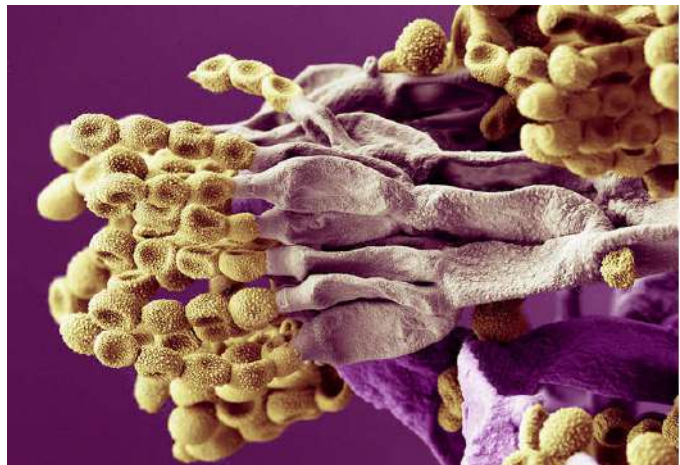
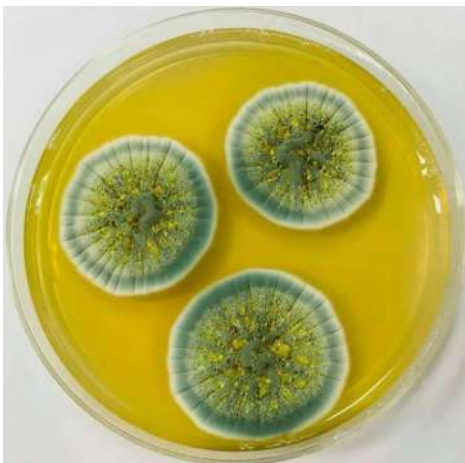


Рисунок 1.14 – Пеніцил золотистий

Назва "пеницилл" походить від латинського слова, що означає "пензлик", через характерний зовнішній вигляд його спороносних структур (конідій), що нагадують пензель художника під мікроскопом. Середовище проживання: широко поширений у помірних та субтропічних регіонах. Зустрічається у ґрунті, на рослинності, а також є частим забруднювачем харчових продуктів та вологих приміщень, особливо у будівлях із пошкодженнями водою. Морфологія: це багатоклітинний грибок, міцелій якого складається з ниток, що

гілкуються (гіф), розділених перегородками. Алерген: спори, що переносяться повітрям, є важливими людськими алергенами і можуть бути пов'язані з астмою та іншими респіраторними захворюваннями. Патогенність: хоча інфекції, що викликаються пеніцилом золотистим, зустрічаються рідко, вони можуть виникати у людей з ослабленою імунною системою і в деяких випадках призводити до смерті.

Чорна цвіль (*Stachybotrys chartarum*) – це різновид грибка, який утворює темно-зелені або чорні колонії на вологих поверхнях. Зовнішній вигляд: темно-зелений або чорний наліт, що утворює плями на стінах, деревині, папері, тканині (рис. 1.15). Вона небезпечна тим, що може спричинити проблеми з диханням, особливо у людей з астмою чи алергіями.

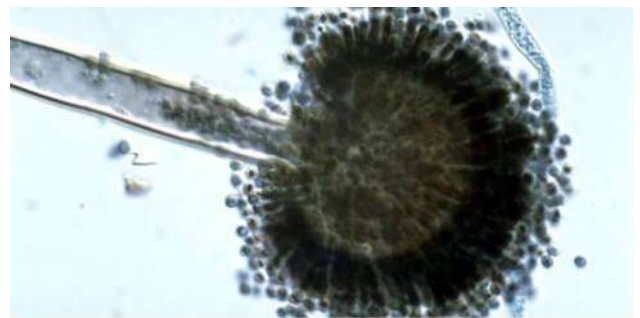


Рисунок 1.15 – Чорна цвіль

Умови росту: теплі та вологі місця – ванні кімнати, кухні, підвали, ділянки з протіканням води. Росте на матеріалах, багатих на целюлозу (гіпсокартон, дерево, папір). Небезпека: тривале перебування поруч із колоніями може викликати кашель, утруднене дихання, подразнення слизових оболонок. Потенційні ризики:

- респіраторні проблеми: особливо у дітей та людей із хронічними захворюваннями легень;
- алергічні реакції: нежить, сльозотеча, висипи;
- токсини: деякі штами можуть виділяти мікотоксини, що подразнюють організм.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. На основі аналізу предметної області «Застосування імпульсних магнітно-плазмових компресорів для антибактеріальної та стерилізаційної обробки» і аналітичного огляду інформаційних джерел за даним напрямком уточнено тему магістерської дипломної роботи: визначено об'єкт, предмет дослідження, сформульовано мету та поставлені задачі.

2. Детально розглянута бактерицидна дія ультрафіолетового випромінювання та сформульовано ряд вимог, які характеризують процес знешкодження інфекційної мікрофлори. Виявлено, що бактерицидною дією володіє ультрафіолетове випромінювання з діапазоном довжин хвиль від 205 до 315 нм, із піком в області 254 нм, що викликає деструктивно-фотохімічне модифіковане ушкодження ДНК клітинного ядра мікроорганізму. Зміни в ДНК мікроорганізмів накопичуються та призводять до затримки темпів їх розмноження і подальшому вимиранню в першому та наступних поколіннях. Наведено перелік найбільш поширених та шкідливих патогенних мікроорганізмів, з якими контактує людини та представлено ступінь їх сприйнятливості до спектру ультрафіолетового діапазону.

## 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

### 2.1. Дослідження пробійної характеристики між електродного проміжку.

Елементи прискорювальної техніки є основою для створення джерел потужного оптичного випромінювання. З метою розробки більш широкосмугових джерел потужного УФ випромінювання, зокрема для стерилізації об'єктів і приміщень, розглядається можливість використання плазмових розрядів в атмосфері. Для цих цілей застосовують генератори широкосмугового оптичного випромінювання, які базуються на плазмі, отриманій внаслідок відкритого розряду в атмосферному проміжку.

Початковий етап дослідження включає аналіз залежності пробійної міцності атмосфери та розрахунок порогової напруженості електричного поля пробою ( $E_{np}$ ) і діапазону висот, де ця міцність зменшується.

Нижня атмосфера Землі (до висоти нижнього шару іоносфери – близько 80 км) уявляється як електрично нейтральне середовище з теоретично нескінченним опором, де електромагнітні хвилі поширюються без поглинання. Однак, внаслідок природних та антропогенних процесів відбувається постійна іонізація нейтральних молекул газів, що призводить до існування певної кількості іонів та вільних електронів, які зумовлюють незначну провідність атмосфери. Зазвичай, поблизу поверхні Землі в  $1 \text{ см}^3$  атмосфери за секунду з'являється приблизно 10 вільних електронів.

Поширення електромагнітних хвиль у нейтральній атмосфері є аналогічним поширенню у вакуумі, але лише до певної величини напруженості електричного поля, яка називається пороговою напруженістю ( $E_n$ ). При перевищенні цієї величини відбувається пробій атмосфери з утворенням великої кількості електронів та іонів і переходом її у стан плазми. Основним параметром атмосфери, що визначає величину порогової напруженості електричного поля, є тиск  $P$ .

Розглянемо, що відбувається у розрядному газовому проміжку, включеному в коло із джерелом живлення, якщо поступово підвищувати напругу  $U$  на електродах. Прикладене електричне поле вважатимемо однорідним:

$$E = U/d, \quad (2.1)$$

де  $d$  – відстань між електродами.

Електричний струм  $I$  в колі, який визначається числом зарядів, що досягають електродів в 1 с, зростає з підвищенням напруги  $U$ . Починаючи з якоїсь напруги, практично всі заряди, електрони та іони, що народжуються в об'ємі, потрапляють на електроди. Струм досягає насичення і перестає залежати від напруги  $U$ . При ще більших напругах починається іонізація молекул електронним ударом, що призводить до підсилення струму, що походить від зовнішніх джерел. При подальшому підвищенні напруги вступають у дію вторинні процеси – народження електронів під дією тих частинок, які з'являються в результаті первинного процесу іонізації газу електронами. Особливо активно впливають вторинні процеси на підсилення, якщо призводять до емісії електронів з електродів. Емітований електрон проходить весь шлях між електродами і тому виробляє більше іонізації, ніж народжений «на півдорозі». З урахуванням вторинної емісії стаціонарний розрядний струм визначається виразом:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}, \quad (2.2)$$

де  $\alpha$  – іонізаційний коефіцієнт Таунсенда  $I_0$  – струм електронів;  $\gamma$  – ефективний коефіцієнт вторинної емісії з електродів, яка відбувається під дією іонів, фотонів і метастабільних атомів, що народжуються в газі в результаті іонізації та збудження атомів електронами. Струм розряду, як і раніше, залишається несамоостійним, поки знаменник додатний. Він наростає із

зростанням напруги  $U$  завдяки зменшенню знаменника, який, в свою чергу, наближається до одиниці при невеликих коефіцієнтах підсилення  $\alpha d$ .

Розглянемо умову запалення самостійного розряду. Якщо подати на електроди таку напругу:

$$U > U_n, \quad (2.3)$$

де  $U_n$  – пробійна напруга, при якій коефіцієнт відтворення

$$\mu = \gamma[\exp(\alpha d) - 1] > 1 \quad (2.4)$$

і знаменник у формулі (2.2) від'ємний, то формула не має фізичного сенсу. Це означає, що при такій напрузі струм може бути стаціонарним. З іншого боку, за  $U < U_n$  коли  $\mu < 1$ , тече стаціонарний несамотійний струм. Умова переходу  $\mu = 1$ , або

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1, \quad \alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right), \quad (2.5)$$

еквівалентно умові протікання стаціонарного самостійного струму в однорідному полі  $E_n = U_n/d$ , де відповідна пробійна напруга  $U_n$  визначається з рівності (2.5).

Справді, формально при  $U = U_n$   $I = 0/0 \neq 0$ , коли  $I_0 = 0$ , тобто коли струм тече навіть за відсутності стороннього джерела електронів. Процеси в розрядному проміжку при цьому самі без сторонньої допомоги забезпечують відтворення електронів, керованих полем. Від одного електрона, що вилетів з одного із електродів, народжується  $e^{\alpha d} - 1$  іонів, і, наблизившись до іншого електрода, кожен вириває  $\gamma$  електронів (якщо емісія іонно-електронна). На зміну одному первинному з'являється один вторинний  $\mu = \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$  і т. д. Перехід несамотійного розряду в самостійний можна в той же час розглядати і як настання пробою. Умова (2.5) через відому функцію  $\alpha(E)$  і  $\gamma$  визначає пробивну напругу  $U_n$  залежно від довжини проміжку між електродами  $d$ . Для

запалювання самостійного розряду електрон повинен здійснити на довжині проміжку  $\alpha d \approx \ln \gamma^{-1}$  актів розмноження, 3-10 актів, якщо  $\gamma \sim 10^{-1}-10^{-3}$ .

Розглянемо далі перебіг процесу пробою у часі. Подати на електроди напругу, точно рівну  $U_n$ , яка забезпечує лише просте відтворення електронів ( $\mu=1$ ) для здійснення пробою недостатньо. Незначний «затравочний» струм між електродами не виростає до макроскопічної величини, яку тільки можна розглядати як струм самостійного розряду. Щоб це сталося, потрібно хоча б невелика перенапруга:

$$\Delta U = U - U_n > 0, \quad (2.6)$$

що забезпечило би розширене відтворення електронів,  $\mu > 1$ . Тоді, якщо в початковий момент з електрода вийшов, скажімо, один електрон, у наступному циклі вийде  $\mu > 1$  вторинних електронів, потім  $\mu^2$  і т. д. Струм та іонізація в газі будуть наростати, поки це не буде зупинено діями рекомбінації або зовнішнього омичного опору  $\Omega$ . На ньому в міру зростання струму падає зростаюча частина напруги джерела живлення  $I\Omega$ , і напруга на електродах  $U$  зменшується. Коли  $U$  впаде до величини  $U_n$ , зростання струму  $I$  припиниться, самостійний струм стане стаціонарним. Таким чином запалюється так званий темний таунсендівський розряд. Це відбувається, коли зовнішній опір настільки великий, що розрядний струм обмежується дуже малою величиною, при якій зовнішнє поле не спотворюється додатним просторовим зарядом, що накопичується в проміжку. В іншому випадку виникає просторова неоднорідність поля і запалюється тліючий розряд. Описаний процес пробою називають таунсендівським, на відміну стримерного.

Знайдемо закон наростання струму на стадії пробою, поки перенапруга ще вважатимуться незмінною. Припустимо, що спочатку емісія відбувається саме під впливом іонів. Іони народжуються поблизу електрода, де кількість електронів внаслідок розмноження максимальна. Позначимо час витягування від одного електроду іонів до іншого через  $\tau$ . Емісія електронів в останній

момент  $t$  зобов'язана тим іонам, які народжувалися від електронів, емітованих період від  $t-\tau$  до  $t$ . Для електронного струму  $I_e$  можна скласти наближене рівняння:

$$I_e(t) \approx I_0 + \mu I_e(t-\tau) \approx I_0 + \mu \left[ I_e(t) - \frac{\tau dI_e}{dt} \right] \quad (2.7)$$

де  $I_0$  – затравочний струм від зовнішнього іонізатора.

Інтегруючи з початковою умовою  $I_e(0)=I_0$  у момент включення зовнішнього поля, знаходимо розрядний струм:

$$I(t) = I_e(t) e^{\alpha d} = I_0 e^{\alpha d} \left[ \frac{\mu}{\mu-1} e^{\left(\frac{\mu-1}{\mu} \cdot \frac{t}{\tau}\right)} - \frac{1}{\mu-1} \right] \quad (2.8)$$

Струм наростає з часом за експоненційним законом, причому тим швидше, чим вищий ступінь перенапруги та  $\mu-1$ . Масштабом часу наростання струму служить величина  $\tau/(\mu-1)$ . Якщо емісія відбувається під дією фотонів, то  $\tau$  має порядок часу дрейфу не іонів, а електронів, тобто пробій розвивається на два порядки швидше. Іонізаційний коефіцієнт  $\alpha$  різко залежить від поля, а підсилення  $e^{\alpha d}$  і коефіцієнт відтворення  $\mu$  також експоненційним чином залежать від  $\alpha$ . Тому досить невеликого перенапруги в кілька відсотків, щоби  $\mu$  помітно перевищила одиницю і пробій розвивався досить швидко. З цієї причини критична величина  $U_n$  визначена з умови  $\mu=1$ , з достатнім ступенем визначеності характеризує поріг пробою. Реальний час розвитку пробою після включення напруги складається з двох частин: щойно розглянутого, масштабом якого служить  $\tau/(\mu-1)$  і часу очікування затравочного електрона (якщо не застосовується інтенсивне штучне джерело). Остання складова часу має статистичний розкид. Зазвичай час запізнення таунсендівського пробою має порядок  $10^{-5} \dots 10^{-3}$  с.

Процес розвитку таунсендівського пробою має лавинний характер розмноження електронів. Кожен цикл від моменту виходу індивідуального

електрона з електрода і до виходу всіх  $e^{ad}$  електронів, що походять від нього можна розглядати як одиничну лавину. Якщо пробій почався з одного випадкового електрона, то після першої лавини у другому циклі пройде в середньому  $\mu > 1$  лавин, у третьому  $\mu^2$  і т. д.

Оскільки кожна лавина дещо розпливається в поперечному напрямі внаслідок дифузії електронів, нова лавина починається загалом з іншого місця електрода. Крім того, початок процесу не завжди кладе один-єдиний електрон, їх може вилітати кілька, з різних місць. Тому таунсендівський пробій найчастіше дифузно охоплює весь об'єм пробійного проміжку. Цим він зовні відрізняється від іскрового, коли між електродами проростає тонкий провідний канал – мініатюрна блискавка, а сусідні ділянки, які також знаходяться в полі, залишаються неіонізованими.

При теоретичних та чисельних дослідженнях розрядів широко використовується емпірична залежність Таунсенда для опису іонізаційного коефіцієнту  $\alpha$ :

$$\alpha = APe^{(-BP/E)} \quad (2.9)$$

де постійні  $A$  і  $B$  визначають шляхом апроксимації експериментальних кривих і для повітря складають:  $A=15$  ( $\text{торр}\cdot\text{см}$ )<sup>-1</sup>,  $B=365$  В/( $\text{торр}\cdot\text{см}$ );  $P$  – тиск;  $E$  – напруженість поля.

Розглянемо величину потенціалу запалювання – величину  $U_n$ . Пробійна напругу  $U_n$  та відповідне поле пробією  $E_n$  залежать від роду газу, матеріалу електродів, тиску та довжини розрядного проміжку.  $d$ . Щоб знайти очевидні залежності, скористаємося формулою (2.9) для  $\alpha$ . Підставляючи її в (2.5), отримаємо:

$$V_n = \frac{B(Pd)}{\ln(Pd) + C}, \quad \frac{E_n}{P} = \frac{B}{\ln(Pd) + C}, \quad \text{де } C = \ln \frac{A}{\ln(1+1/\gamma)}, \quad (2.10)$$

Вираз (2.10) описує залежність порогового поля від тиску (закон Пашена).

Потенціал запалювання  $U_n$  та  $E_n/P$  визначаються лише добутком  $Pd$ . У цьому і проявляється закон подібності. Визначення  $U_n$  із виразу (2.10) з експериментальними значеннями констант  $A$  і  $B$  має високу кореляцію з емпіричним досвідом [10-14].

Експериментальні залежності  $V_n(Pd)$  називаються кривими Пашена і представлені на рис. 2.1.

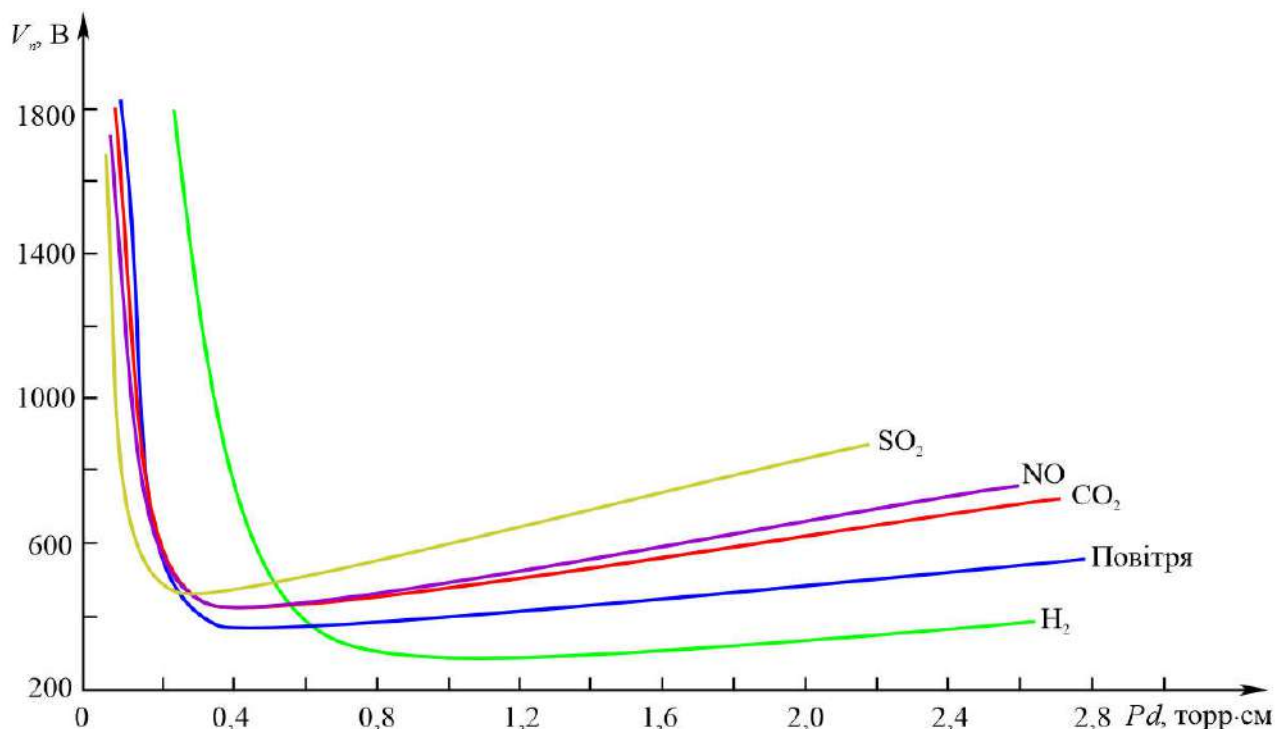


Рисунок 2.1 – Закон розподілу пробійного поля (криві Пашена)

Видно, що залежність є істотно нелінійною і визначається певним мінімумом напруги пробією розрядного проміжку, тобто існує таке значення тиску, для якого пробійна напруженість електричного поля є нижчою, причому положення мінімуму, у свою чергу, залежить від складу атмосфери.

Відповідно до (2.10) параметри точки мінімуму наступні ( $\bar{e} = 2,72$ ):

$$(Pd)_{min} = \frac{\bar{e}}{A} \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right), \quad \left(\frac{E}{P}\right)_{min} = B, \quad U_{min} = \frac{\bar{e}B}{A} \ln\left(1 - \frac{1}{\gamma}\right), \quad (2.11)$$

Значення  $E/P$  у мінімумі відповідає точці, де іонізаційна здатність електрона  $\mu = \alpha / E = A / B\bar{e}$  максимальна. Проміжок пробивається при цьому найлегше, тому що оптимальні умови для розмноження. На відміну від  $U_{min}$  та  $(pd)_{min}$  величина  $(E/P)_{min}$  не залежить від матеріалу електрода (від  $\gamma$ ), що підтверджується дослідним шляхом (рис. 2.2).

Порівняємо оцінку за формулами (2.11) з експериментом. Для повітря  $A=15$ ,  $B=365$ . Наприклад, для  $\gamma=10^{-2}$  за формулами (2.11) виходить:

$$C=1,18; \quad (Pd)_{min}=0,83 \text{ торр}\cdot\text{см}; \quad (E/P)_{min}=365 \text{ В}/(\text{торр}\cdot\text{см}); \quad U_{min}=300 \text{ В}.$$

Дослідні значення у разі залізного електрода:

$$(Pd)_{min}=0,57 \text{ торр}\cdot\text{см}; \quad (E/P)_{min}=580 \text{ В}/(\text{торр}\cdot\text{см}); \quad U_{min}=330 \text{ В}.$$

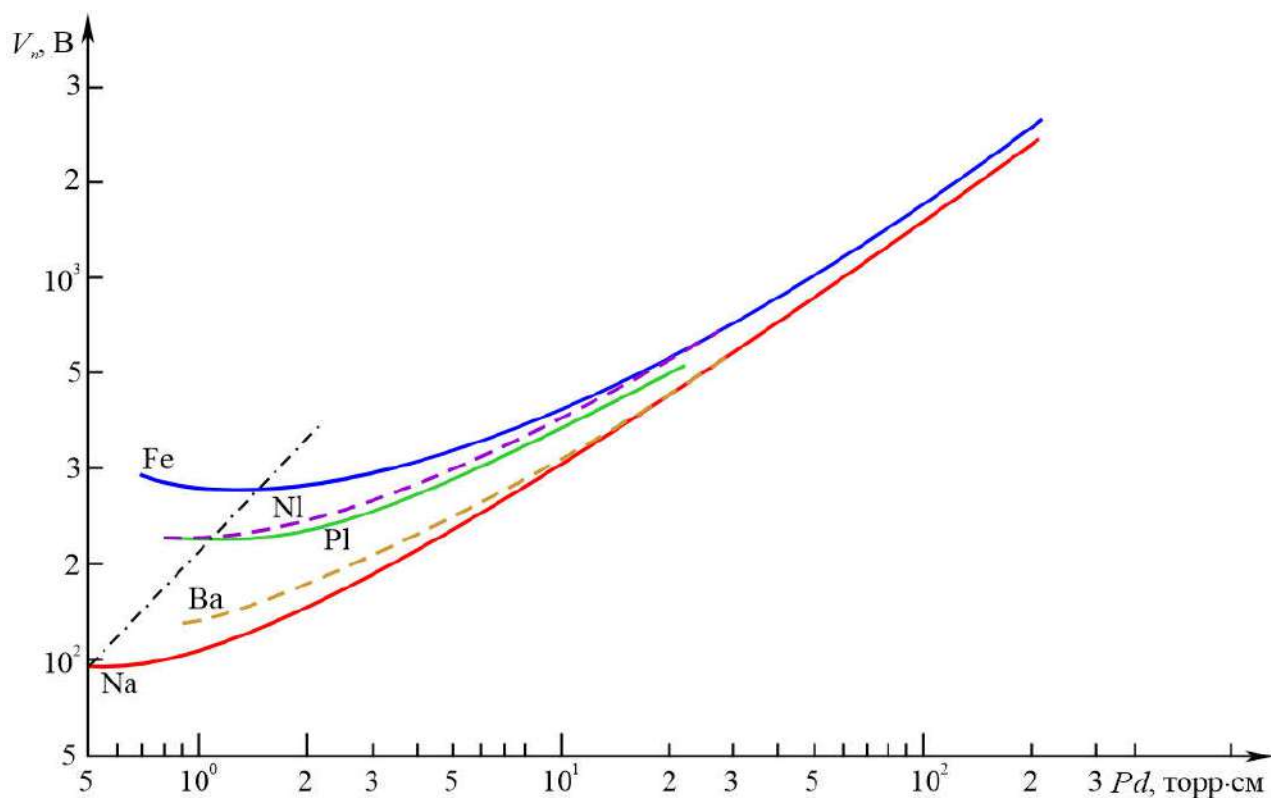


Рисунок 2.2 – Вплив матеріалу електрода на напругу пробую.

Штрих-пунктирна пряма з'єднує точки мінімуму. Її нахил  $45^\circ$  відповідає незалежності  $(E/P)_{min}$  від матеріалу електрода.

В області відносно великих значень  $Pd$ , на правій гілці кривої Пашена порогова величина  $E_{п}/P$  досить повільно, за логарифмічним законом

зменшується зі зростанням  $Pd$ . Відповідно напруга пробою зростає майже пропорційно  $Pd$  (трохи повільніше). Така поведінка порогових величин пояснюється тим, що у разі підвищених тиску довгих проміжків, електрон може зробити багато іонізуючих зіткнень навіть при не дуже високих значеннях  $E/P$ . Але в цьому випадку  $\alpha$  різко залежить від  $E/P$  і умова необхідного підсилення (2.5) досить жорстко фіксує значення  $E/P$ .

Навпаки, за малих  $Pd$ , на лівій гілці можливостей для зіткнень мало. Для досягнення належного підсилення необхідна дуже велика величина  $\alpha/P$ , тобто дуже сильне поле. Напруга пробою швидко зростає із зменшенням  $Pd$ . Звідси і мінімум напруги. З огляду на обмеженість ефективного перерізу іонізації, іонізаційний коефіцієнт  $\alpha$  також обмежений (величиною  $AP$ ). Тому у разі досить малих значень  $Pd$  ні за яких полів не може бути забезпечене необхідне підсилення. У рамках цього наближення  $U_n \rightarrow \infty$ , якщо  $Pd$  зверху зменшується до граничного значення  $(Pd)_{cp}$ :

$$(Pd)_{cp} = A^{-1} \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = \frac{(Pd)_{min}}{\bar{e}} \quad (2.12)$$

Зрозуміло, що реальне наростання  $E_n/P$  і  $U_n$  на лівих гілках кривих Пашена відбувається повільніше і, зрозуміло, не нескінченно.

Пояснення вигляду залежності Пашена (рис. 2.1) полягає в наступному. В області малих тисків (розріджена атмосфера): щільність молекул газу занадто мала, що унеможливорює утворення достатньої щільності плазми для пробою, оскільки вільні електрони не здійснюють необхідної кількості зіткнень із молекулами.

В області великих тисків: щільність молекул настільки висока, що електрони зіштовхуються з молекулами атмосфери, не встигаючи набрати в електричному полі енергії, достатньої для їх іонізації. Внаслідок зіткнення може відбутися збудження молекули, а електрон втрачає енергію. Для іонізації необхідне або декілька зіткнень, або настільки велике поле, щоб електрон набував достатньої енергії для утворення іону в результаті кожного зіткнення.

Оптимальний тиск: існує такий тиск, при якому електрони набувають достатньої енергії за умови відповідної до цього тиску щільності молекул.

Визначимо залежність пробійної напруги поля у повітрі від товщини проміжку між електродами для таунсендівського механізму пробою. Для останнього характерні знижений тиск і невеликі  $Pd < 1000 \text{ торр}\cdot\text{см}$ . У разі коротких проміжків та однорідних полів механізм розмноження лавин діє і при атмосферному тиску. У кімнатному повітрі у плоских проміжках він реалізується приблизно до  $d < 5 \text{ см}$  ( $Pd < 4000 \text{ торр}\cdot\text{см}$ ). Напруга пробою при настільки великих  $Pd$  змінюється більш менш пропорційно  $Pd$ , тобто пробійне поле не сильно залежить від  $Pd$  і для газів атмосферного тиску характерні певні значення пробійного поля або  $(E/P)_i$ . На рис. 2.3 представлені результати вимірювання для кімнатного повітря проміжку  $d$  для таунсендівського механізму.

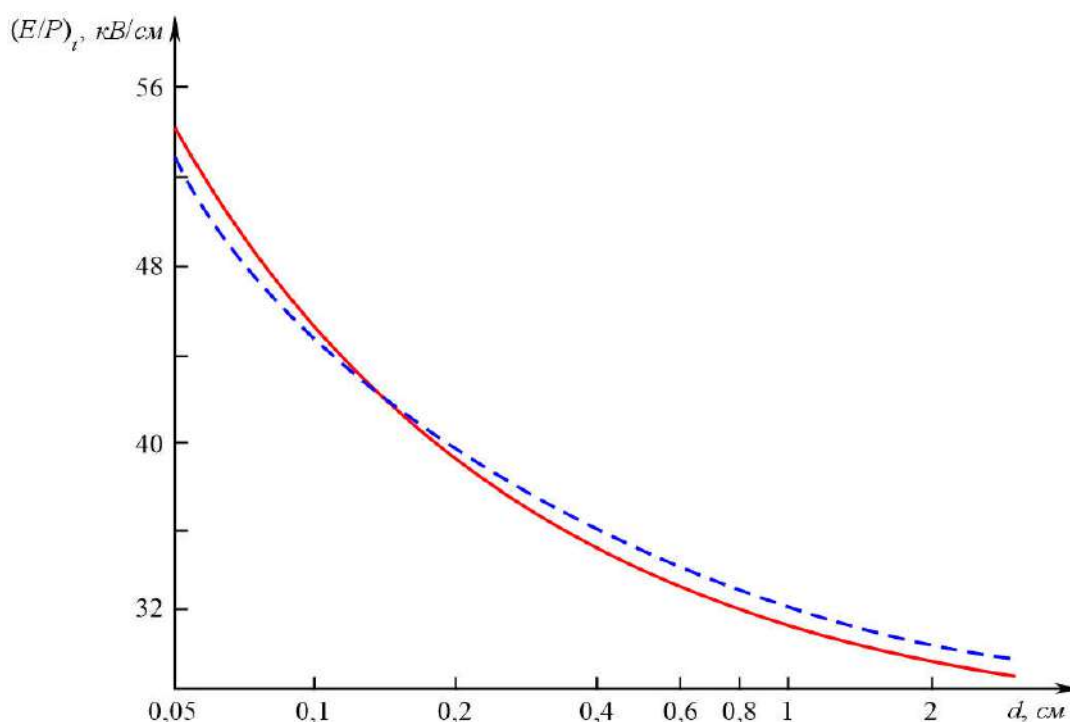


Рисунок 2.3 – Пробійні поля в повітряному зазорі в залежності від товщини відстані  $d$  між електродами при  $P=1 \text{ атм}$ .

Для проміжків сантиметрових розмірів характерні цифри  $(E/P)_i \approx 32 \text{ кВ}/(\text{см}\cdot\text{атм.}) = 42 \text{ В}/(\text{торр}\cdot\text{см})$ .

## 2.2. Математична модель генерування імпульсних випромінювань оптичного діапазону.

Ефекти дії високоінтенсивних імпульсів на різні об'єкти проводяться з використанням джерел випромінювання на основі техніки сильноточових прискорювачів заряджених частинок. На основі такої техніки реалізуються генератори НВЧ випромінювання, які при використанні різних електродинамічних структур дозволяють генерувати радіоімпульси з носійною частотою в сантиметровому діапазоні довжин хвиль. Елементи високовольтної техніки прискорювачів електронів лежать в основі побудови джерел надширокосмугового (НШС) випромінювання несинусоїдальної форми нано- і субнаносекундної тривалості. Елементи прискорювальної техніки лежать в основі побудови джерел потужного оптичного випромінювання. Найбільш потужними джерелами електромагнітного випромінювання штучної антропогенної природи є генератори імпульсних напруг на основі техніки прискорювачів заряджених частинок.

Для визначення параметрів генератора імпульсних напруг (струму розряду, тривалості імпульсів розряду, миттєвої потужності) розглянемо контур (рис. 2.4), який складається з конденсатора ємністю  $C$ , паразитної індуктивності  $L$  і опору плазми  $R$  ( $R \sim 10^{-2}$  Ом і нижче).

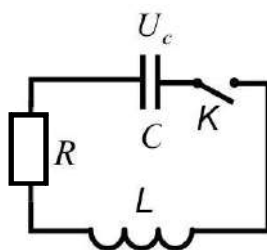


Рисунок 2.4 – Схема коливального контуру з опором  $R$

Початковою умовою роботи схеми являється заряд конденсатора до напруги величиною  $U_c$ . Після замикання ключа  $K$  відбувається розряд конденсатора, характер якого залежить від параметрів  $L$ ,  $R$  та  $C$ .

Для аналізу даної схеми запишемо закон Ома для усталеного процесу в колі з  $R$  і  $L$ :

$$i = \frac{U_c - L \frac{di}{dt}}{R}, \quad (2.13)$$

звідки

$$U_c = L \frac{di}{dt} + iR. \quad (2.14)$$

При розряді конденсатора струм

$$i = -\frac{dq}{dt}, \text{ а } q = CU_c, \quad (2.15)$$

тоді

$$i = -C \frac{dU_c}{dt} = -CL \frac{d^2i}{dt^2} - CR \frac{di}{dt}. \quad (2.16)$$

Поділивши на  $CL$  і перетворивши, отримаємо рівняння розряду конденсатора:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{CL} i = 0. \quad (2.17)$$

Введемо позначення:

$$\frac{R}{L} = 2\delta, \quad (2.18)$$

$$1/CL = \omega_0. \quad (2.19)$$

Тоді рівняння (2.13) прийме вигляд:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\delta \frac{di}{dt} + \omega^2 = 0. \quad (2.20)$$

Це лінійне диференційне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, рішення якого будемо шукати у формі:

$$i = Ae^{mt}, \quad (2.21)$$

де  $A$  і  $m$  – поки невизначені постійні.

Підставивши похідні  $di/dt = mi$ ,  $d^2i/dt^2 = m^2i$  і скорочуючи на  $i = Ae^{mt}$  отримаємо характеристичне рівняння:

$$m^2 + 2\delta m + \omega_0^2 = 0, \quad (2.22)$$

з якого визначаємо значення  $m$ :

$$m_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = -\delta \pm \beta, \quad (2.23)$$

де

$$\delta = \frac{R}{2L}; \quad \beta = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2} = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{CL}}. \quad (2.24)$$

Наявність двох коренів показує, що загальне рішення рівняння (2.20) повинно складатися з двох членів:

$$i = A_1 e^{m_1 t} + A_2 e^{m_2 t}. \quad (2.25)$$

Постійні коефіцієнти  $A_1$   $A_2$  визначаються з початкових умов: при  $t=0$ ,  $i=0$ , тобто,

$$A_1 = -A_2. \quad (2.26)$$

В момент замикання кола прикладена напруга  $U_c$  урівноважується протилежною ЕРС самоіндукції:

$$U_c = L \frac{di}{dt}, \quad \frac{di}{dt} = \frac{U_c}{L}. \quad (2.27)$$

Продиференціювавши (2.25) та враховуючи (2.26), (2.27), і (2.23) отримуємо:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_c}{L} = m_1 A_1 + m_2 A_2 = -\delta A_1 + \beta A_1 + \delta A_1 + \beta A_1 = 2\beta A_1, \quad (2.28)$$

звідки

$$A_1 = \frac{U_c}{2\beta L}, \quad A_2 = -\frac{U_c}{2\beta L}. \quad (2.29)$$

Підставляючи в рівняння (2.25), отримаємо загальне рішення:

$$i = \frac{U_c}{2\beta L} e^{-\delta\tau} (e^{\beta\tau} - e^{-\beta\tau}). \quad (2.30)$$

Однак рішення (2.30) може мати різні значення в залежності від того, чи є  $\beta$  дійсною або уявною величиною, або ж вона дорівнює нулю.

Нехай  $\delta^2 < \omega_0^2$  або, підставивши значення  $\delta$  і  $\omega_0^2$  з (2.24),

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2.31)$$

тоді  $\beta$  є уявною величиною.

Введемо позначення  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  та запишемо (2.24) у вигляді:

$$\beta = j\omega, \quad (2.32)$$

де  $j = \sqrt{-1}$ .

Підставивши в загальне рішення (2.30) і використав формули Ейлера для переходу від показових до тригонометричних функцій, отримаємо рівняння для миттєвого струму:

$$i = \frac{U_c}{\omega L} e^{-\delta\tau} \frac{e^{j\omega\tau} - e^{-j\omega\tau}}{2j} = \frac{U_c}{\omega L} e^{-\delta\tau} \sin \omega\tau, \quad (2.33)$$

де  $\omega = 2\pi / \sqrt{LC}$  – частота коливань.

Отже, при виконанні умови (2.31) розряд є коливальним, амплітуда коливання загасає за експоненціальним законом з коефіцієнтом загасання коливань  $\delta$ .

Величина  $\omega$  є круговою частотою загасаючих коливань. Так як  $\omega = 2\pi / T$ , то період загасаючих коливань буде:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (2.34)$$

Періодичні коливання в електричному контурі розраховуються за формулою Томсона при дуже малому  $R$  (другим членом під коренем в (2.34) можна знехтувати):

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2.35)$$

Миттєве значення напруги на конденсаторі розраховуються, як

$$u = \frac{U_C}{\omega\sqrt{LC}} e^{-\delta\tau} \sin(\omega\tau + \varphi), \quad (2.36),$$

де

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\omega L}{R}.$$

На основі побудованих часових залежностей  $i(t)$  і  $u(t)$  можна побудувати залежність миттєвої потужності, яка розраховується як:

$$p(t) = i(t) \cdot u(t). \quad (2.37)$$

Інтегральну оцінку величини втрат запасеної енергії конденсатора можна здійснити за допомогою виразу:

$$W(t) = \int_0^t p(t) \cdot dt. \quad (2.38)$$

Величину втрат запасеної енергії на конденсаторі, величину струму, напруги та потужності також можна оцінити, інтегруючи перший напівперіод осцилограм за наступними формулами:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i^2(t) \cdot dt}, \quad (2.39)$$

де  $i(t)$  – часова залежність струму розряду

$$U_e = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} u^2(t) \cdot dt}, \quad (2.40)$$

де  $u(t)$  – часова залежність зарядної напруги

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} p^2(t) \cdot dt}, \quad (2.41)$$

де  $p(t)$  – часова залежність потужності розряду

$$W_e = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} W^2(t) \cdot dt} \quad (2.42)$$

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Розроблена математична модель генерування широкопasmових імпульсних випромінювань оптичного діапазону на основі техніки магнітоплазмових прискорювачів заряджених частинок. В рамках моделі детально розглянуті процеси, які протікають в розрядному проміжку. Розглянуто перебіг процесу пробою у часі, виникнення та наростання стуму розряду та умов запалення самостійного розряду. Виявлено, що перебіг розрядних процесів підпорядковується моделі Таунсенда.

2. Розроблена математична модель імпульсного електромагнітного випромінювання з нелінійною залежністю електродинамічних характеристик та виконані розрахунки розподілу пробійної напруженості поля атмосфери широкопasmовим джерелом потужного ультрафіолетового випромінювання на основі плазмових розрядів.

Проведена оцінка та вирішена задача скорочення імпульсу при пробою атмосфери випромінюванням при використанні електронно-пучкової антени, що дає можливість генерувати короткоімпульсні несинусоїдальні широкопasmові випромінювання нано- і субнаносекундної тривалості при безпосередньому збудженні випромінюючої структури електронним пучком.

3. За результатами моделювання побудовані часові залежності значень миттєвого струму розряду накопичувача, миттєвої напруги, миттєвої потужності, величини втрат запасеної енергії при розряді конденсатора та розраховані максимальні значення миттєвого струму розряду накопичувача, миттєвої потужності, отримані ефективні значення втрат запасеної енергії на конденсаторі, величин струму, напруги та потужності при різних значеннях опору, індуктивності та зарядної напруги розрядного контуру генератора імпульсного стерилізатора на основі магнітоплазмового компресора з плазмовою гарматою. Надано рекомендацій щодо оптимізації структури джерела електромагнітного випромінювання.

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ НАДКОРОТКИХ ВИСОКОСТРУМОВИХ РОЗРЯДІВ

#### 3.1. Вибір типу накопичувача енергії.

В магнітоплазмовому компресорі елементом накопичення енергії є блок конденсаторів. В 4 розділі буде здійснено вибір конкретного типу та форм-фактору даної складової. Однак, щоб це здійснити, необхідно розрахувати вихідні параметри блоку накопичення енергії та сформувані критерії для його оцінки.

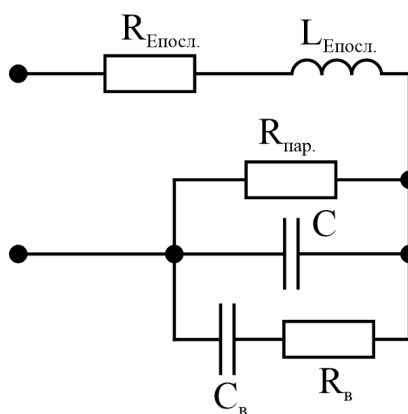


Рисунок 3.1 – Еквівалентна схема силового конденсатора

Еквівалентна схема містить наступні елементи:

- $R_{\text{Епocл.}}$  – еквівалентний послідовний опір, активна складова опору обкладок та виводів конденсатора на робочій частоті; величина опору залежить від способу металізації обкладинок, конструкції виводів і робочої частоти; наявність даного опору призводить до розсіювання енергії на конденсаторі та, відповідно, зниження продуктивності при протіканні великих змінних струмів;
- $L_{\text{Епocл.}}$  – еквівалентна послідовна індуктивність; паразитна індуктивність виводів, яка найбільше впливає на рівень пульсацій напруги при високих робочих частотах; кількісно вона залежить від технології намотування та конструкції виводів;
- $C$  – номінальна ємність конденсатора;

-  $R_{\text{пар.}}$  – паралельний опір (опір витоку конденсатора); даний опір зумовлений наявністю струму витоку  $I_{\text{пар.}}$  і визначається відношенням напруги  $U_C$  на конденсатора до значення цього струму:

$$R_{\text{пар.}} = \frac{U_C}{I_{\text{пар.}}} \quad (3.1)$$

Найбільший струм витоку мають конденсатори електролітичного типу (танталові та алюмінієві). При використанні полікристалічних та плівкових конденсаторів спостерігається незначний струм витоку за рахунок високого опору ізоляції.

$R_v$ ,  $C_v$  – параметри втрат у конденсаторі (діелектрична абсорбція); характеризує еквівалентний активний опір, зумовлений втратами в ізолюючому діелектрику та наскрізними струмами витоку, що визначається тангенсом кута діелектричних втрат на робочій частоті; втрати енергії у конденсаторі визначаються втратами у діелектриці та обкладинках.

Параметри  $R_{\text{Епосл.}}$  і  $R_v$  обмежують значення максимально допустимої реактивної потужності конденсатора на конкретній частоті.

Розробимо вимоги до вибору блоку силових конденсаторів обраного типу LNK-Pxx (дані вимоги стосуються будь-якого типу конденсаторів).

Напруга. В 2 розділі був змодельований пробійний процес в ізольованому проміжку і мінімальна напруга пробією складала 300 В. Також було доказано, що напруга, яка подається в розрядний проміжок має бути більшою за пробійну:  $U > U_n$ . Отже, конденсатор необхідно обирати з наступних міркувань: мінімальна робоча напруга –  $U_{\text{min}} = (1,5-3)U_n = 450-900 \text{ В}$ .

Однак, крім напруги, слід врахувати запасену конденсатором енергію (W), яка вимірюється в джоулях (Дж) і розраховується за відомою формулою:

$$W = \frac{1}{2}CU^2 \quad (3.2)$$

де:  $C$  – ємність конденсатора (Ф),  $U$  – напруга на конденсаторі (В).

Відомі [8-14] МПК в якості накопичувача енергії містили 2-3 конденсатори ємністю 40-100 мкФ, з робочою напругою 2-3 кВ.

Запасена енергія одного конденсатора ємністю 100 мкФ із робочою напругою 3 кВ складає:

$$W_{C1} = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}100 \cdot 10^{-6} \cdot (3000)^2 = 450 \text{ Дж}$$

Батарея із 3 подібних конденсаторів дозволяє запасати енергію порядку 1,35 кДж.

Немаловажним питанням для МПК є експлуатаційна надійність конденсаторів, адже працювати їм доводиться в доволі критичних умовах. Експлуатаційна надійність конденсаторів у складі електронної апаратури формується під впливом сукупності зовнішніх і внутрішніх чинників, які визначають стабільність їх параметрів та термін служби. За фізичною природою ці чинники доцільно поділяти на такі основні групи:

- електричні навантаження;
- механічні навантаження;
- кліматичні впливи та вплив середовища експлуатації;
- додаткові специфічні фактори (наприклад, вібрація, радіація, тощо).

Дія зазначених факторів призводить до поступових або стрибкоподібних змін електричних характеристик конденсаторів, таких як ємність, тангенс кута діелектричних втрат, опір ізоляції та пробивна напруга. Найбільш поширеними в реальних умовах експлуатації є електричні та кліматичні навантаження, які потребують детального аналізу.

Температура і вологість навколишнього середовища належать до визначальних параметрів, що безпосередньо впливають на довговічність і надійність конденсаторів. Тривала робота за підвищених температур прискорює процеси термічного старіння діелектрика, що проявляється у зростанні діелектричних втрат і зниженні електричної міцності. Ці зміни, як правило, мають незворотний характер. Особливо небезпечними є циклічні

температурні режими, які викликають термічні напруження в конструкції конденсатора та можуть призводити до мікротріщин у діелектрику або порушення контактів.

Окрім температури навколишнього середовища, істотний вплив має внутрішній тепловий режим апаратури. Нагрівання від сусідніх силових або високонавантажених елементів підвищує робочу температуру конденсаторів і, відповідно, зменшує їхній ресурс. Сучасні підходи до підвищення надійності передбачають теплове моделювання, оптимальне компонування плат і використання конденсаторів з підвищеним температурним класом.

Підвищена вологість також істотно впливає на експлуатаційні характеристики конденсаторів. На їхні параметри діє як плівка вологи на поверхні корпусу, так і дифузійне проникнення водяної пари в діелектрик. Тривалий вплив вологи найбільш негативно позначається на негерметизованих і полімерних конденсаторах, у яких зростає струм витоку та знижується електрична міцність. Крім того, волога ініціює корозійні процеси в металевих обкладках, виводах і контактній арматурі, що може спричиняти відмови контактного характеру.

Найсуттєвіші незворотні зміни параметрів зазвичай пов'язані з тривалим електричним навантаженням. При роботі під постійною напругою основними механізмами деградації є електрохімічні процеси в діелектрику, інтенсивність яких зростає зі збільшенням температури та вологості. У випадку змінної напруги та імпульсних режимів визначальну роль відіграють іонізаційні процеси, часткові розряди та локальні перенапруження, що виникають у зонах неоднорідності електричного поля, зокрема поблизу країв обкладок або газових включень.

Сучасна практика експлуатації передбачає вибір робочої напруги з обов'язковим запасом відносно номінального значення, що знижує ймовірність електричного пробою та уповільнює процеси старіння. Перевищення допустимих рівнів напруги або струмового навантаження різко скорочує термін служби конденсаторів і зменшує загальну надійність апаратури. Тому підвищення експлуатаційної надійності досягається комплексом заходів:

правильним вибором типу конденсатора, дотриманням режимів роботи, захистом від несприятливих кліматичних впливів і застосуванням сучасних матеріалів та технологій виготовлення.

В роботі пропонується використовувати сучасні конденсатор типу LNK-Rxx. Оберемо кілька типових пристроїв та розрахуємо можливу запасену ними енергію.

Таблиця 3.1 – Вибір конденсаторів для блоку накопичення заряду МПК

Тип конденсатора	Напруга, В	Ємність, мкФ	Розрядний струм робочий / піковий, А	Накопичена енергія, кДж
LNK-P4X	1100	900	120 / 7000	0,5
LNK-P9X	2000	400	120 / 10000	0,8
LNK-M3-1230-1300	1300	1230	100/7700	1,04
LNK-P5X	1000	5300	250/29000	2,65

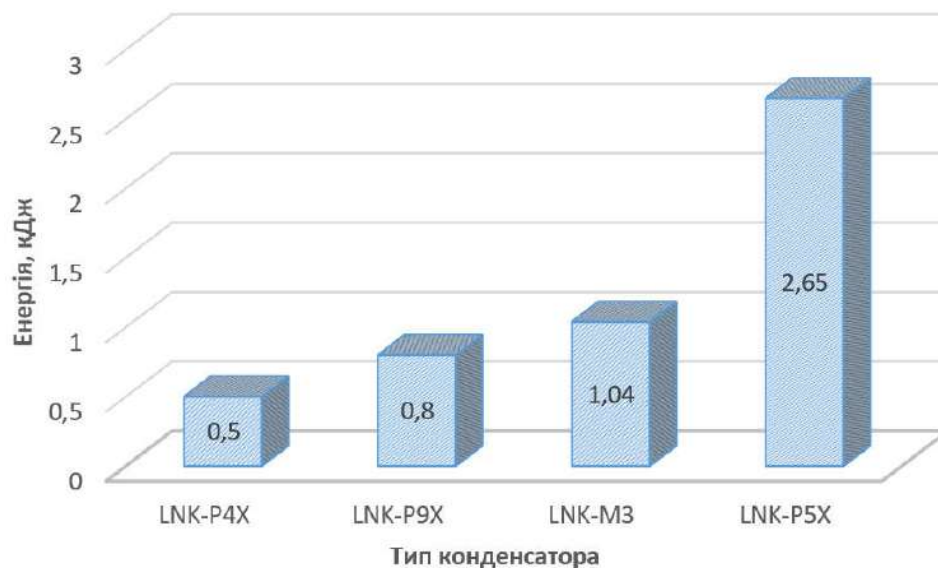


Рисунок 3.2 – Графічне представлення вибору конденсаторів МПК

Як бачимо із порівняння, існують сучасні конденсатори, параметри яких перевищують застарілі більш ніж у 5 разів. А використання 3 таких конденсаторів дасть колосальний запас енергії, порядку 8 кДж.

Слід сказати, що у лінійці даних конденсаторів є широкий вибір і можна взяти як менш, так і більш високовольтний варіант (наприклад замість 1000 В

обрати конденсатор 3000 або навіть 5000 В), зрозуміло, що із відповідним меншим значенням ємності. Однак запасена ними середня енергія зберігатиметься на постійному рівні в межах типоміналу.

### 3.2. Розрахунок параметрів накопичувача енергії.

Розрахуємо струмові режими магнітоплазмового компресора, зокрема  $I_{rms}$  та  $I_{max}$ . Розрахунок пікового струму конденсатора залежить від режиму роботи кола, способу заряджання та параметрів джерела.

Заряд конденсатора від джерела напруги через опір. В нашому випадку опір має порядок  $10^{-3}$  Ом. Піковий струм виникає в момент вмикання, коли відбувається основний розряд конденсатора (батареї конденсаторів) ( $t=0$ ), коли конденсатор поводить як коротке замикання.

$$I_{\text{пик.}} = \frac{U}{R} \quad (3.3)$$

Цей струм не залежить від ємності, а визначається лише напругою джерела та сумарним активним опором:

- зовнішній опір,  $R_3$ ;
- внутрішній опір джерела  $R_{\text{вн}}$ ;
- ESR конденсатора;
- опір провідників.

Практичне уточнення:

$$R_{\Sigma} = R_3 + R_{\text{вн.}} + \text{ESR} \quad (3.4)$$

$$I_{\text{пик.}} = \frac{U}{R_{\Sigma}} \quad (3.5)$$

Піковий струм при змінній напрузі. Для синусоїдального струму:

$$i(t) = C \frac{dU(t)}{dt}$$

Якщо

$$U(t) = U_m \cdot \sin(\omega t),$$

тоді

$$i(t) = \omega C U_m \cos(\omega t)$$

I, відповідно, пікове значення струму:

$$I_{\text{пик.}} = \omega C U_m = 2\pi f C U_m \quad (3.6)$$

де:  $f$  – частота;  $U_m$  – амплітуда напруги;

Для імпульсного режим (імпульсу напруги з фронтом  $\Delta t$ ):

$$I_{\text{пик.}} \approx C \frac{U}{\Delta t} \quad (3.7)$$

Інженерні зауваження з надійності: з урахуванням експлуатаційної надійності силових конденсаторів:

- необхідно перевірити допустимий піковий струм за паспортом виробу;
- проконтролювати струм пульсацій
- проконтролювати нагрів (рекомендується застосувати NTC-термістори);
- прийняти міри до зменшення ESR шляхом паралельного вмикання конденсаторів (в нашому випадку можливе з'єднання від 2 до 4 конденсаторів).

Розглядаємо розряд зарядженого конденсатора через послідовне RL-коло після замикання ключа К. Це класичний перехідний процес у серійному RLC-контурі з початковою умовою  $U_C(0) = U_0$ .

Вихідні дані для пропонованого МПК:

$$C1 = 5300 \mu\text{Ф} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ф};$$

$$U_0 = 1000 \text{ В};$$

$$R = 0,0029 \text{ Ом};$$

$$L = 10 \text{ нГн} = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

Власна кругова частота:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx 1,37 \cdot 10^5 \text{ рад/с}$$

Коефіцієнт затухання:

$$\alpha = \frac{R}{2L} = 1,45 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$$

Оскільки  $\alpha \approx \omega_0$ , контур знаходиться поблизу критичного режиму. Осциляції практично відсутні, але піковий струм дуже великий. Для розряду конденсатора через малий опір і дуже малу індуктивність максимальний струм практично визначається опором:

$$I_{\text{пик.}} \approx \frac{U_0}{R} = 3,45 \cdot 10 \cdot \text{А}; \quad (3.8)$$

Відповідно, енергія на одному конденсаторі запропоновано типу:

$$W_{C1} = \frac{1}{2} CU^2 = 2650 \text{ Дж} \quad (3.9)$$

Таким чином вдається одержати стаціонарні потоки плазми зі швидкостями  $10^5 \dots 10^7$  см/с.

Графічне представлення розрядного процесу на основі високострумowego конденсатора. Струм різко наростає від нуля одразу після замикання ключа. Максимум досягається на дуже малому відрізку часі порядку одиниць-десятків мікросекунд. Далі струм швидко спадає без виражених коливань, що відповідає режиму, близькому до критичного затухання. Амплітуда піку становить сотні кілоампер, що узгоджується з представленою вище оцінкою. Фізично це означає, що надмала індуктивність майже не стримує фронт струму, а форма процесу  $i(t)$  визначається балансом між енергією конденсатора та активними втратами.

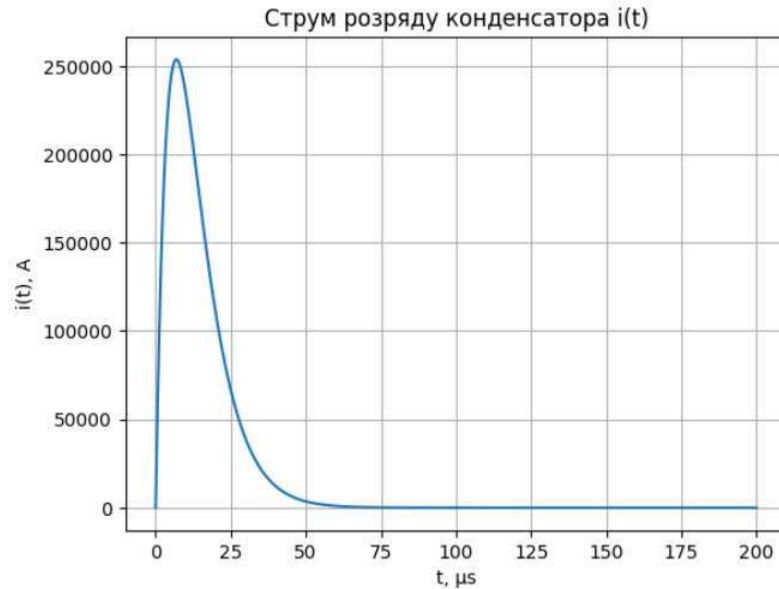


Рисунок 3.3 – Графічне представлення розрядного процесу на основі високострумового конденсатора для запропонованої моделі МПК

Слід враховувати, що температуру гарячої точки можна оцінити наступним чином. Найгарячіша точка обмотки конденсатора:

$$T_C = T_R \cdot P + T_{н.с.} \quad (3.10)$$

де  $T_R$  – термічний опір між гарячою точкою в обмотці та навколишнім середовищем (природне охолодження), У разі примусового повітряного охолодження термічний опір зменшиться на 20%;  $T_R$  – глобальний параметр, який не враховує локалізований перегрів через струм високої частоти;  $P$  – активна потужність втрат;  $T_{н.с.}$  – температура навколишнього середовища.

Загальну розсіювану потужність можна розрахувати наступним чином:

$$P = Q \operatorname{tg} \delta_0 + R_s I_{rms}^2 \quad (3.11)$$

де  $\operatorname{tg} \delta_0$  – коефіцієнт діелектричних втрат, який можна вважати постійним у нормальному робочому діапазоні частот; типове значення для поліпропілену становить  $2 \cdot 10^{-4}$ ;

$R_s$  – послідовний опір, що представляє собою суму всіх омичних опорів у конденсаторі та базується на середніх параметрах металізації плівки;

$I_{rms}$  – номінальний середньоквадратичний струм;

$Q$  – реактивна потужність, яка вимірюється у вольт-амперах реактивних (ВАр) або кіловольт-амперах реактивних (кВАр) і характеризує обмін енергією між джерелом та навантаженням, а не її перетворення в тепло чи роботу:

$$Q=U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \text{ або } Q = 2\pi f C U_{rms}^2 \quad (3.12)$$

$Q$  – реактивна потужність, Вар;  $U$  – напруга, В;  $I$  – сила струму, А;  $\sin(\varphi)$  – синус кута зсуву фаз між напругою та струмом.

Під час стаціонарної роботи температура гарячої точки  $T_C$  не повинна перевищувати максимальну температуру, зазначену в технічних параметрах заводу-виробника для кожного сімейства конденсаторів. При номінальному режимі роботи та температурі гарячої точки 70 °С (65 °С для серій LNK-M3, LNK-M2 та LNK-P3) очікуваний термін служби становить 100 000 годин зі статистичним коефіцієнтом відмов 300 FIT (97% виживання).

Теплова перевірка базується на гіпотезі, що тепло, що утворюється в конденсаторі, передається в навколишнє середовище через поверхню корпусу. Можливий локальний перегрів (погані з'єднання, гарячі компоненти поблизу, як і інші конденсатори, робота з високою частотою гармонік тощо) може призвести до різкого виходу конденсатора з ладу або скорочення очікуваного терміну служби. Слід проводити спеціальні випробування за допомогою термопар, щоб переконатися, що максимальна температура гарячої точки не перевищена навіть за найкритичніших умов навколишнього середовища. Конденсатори з термопарами можуть бути надані на запит. Термін служби конденсатора може бути значно скорочений якщо його піддавати впливу надмірного тепла. Конденсатори повинні охолоджуватися та бути захищеними від зовнішніх джерел тепла. Спеціальні випробування за допомогою термопар слід проводити, щоб переконатися, що максимальна температура гарячої точки не перевищена навіть за найкритичніших умов навколишнього середовища. Конденсатори не повинні розміщуватися поблизу джерел тепла, і між конденсаторами має бути мінімальний зазор 20 мм.

Теоретичні очікувані терміни служби в залежності від напруги та температури гарячої точки для різних типів конденсаторів, що пропонуються в якості блоку накопичення енергії магнітоплазмового компресора представлені на рис. 3.3 та 3.4.

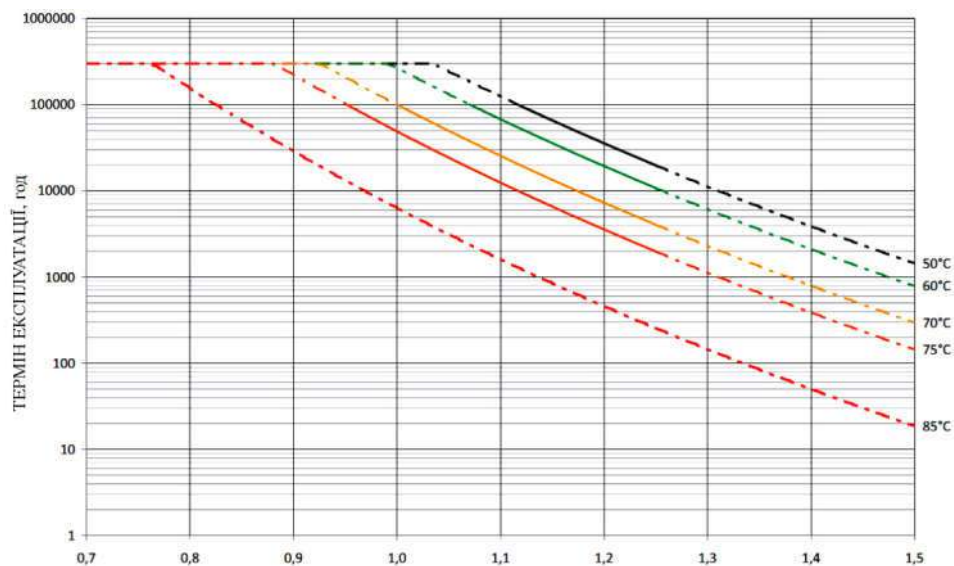


Рисунок 3.3 – Теоретичний очікуваний термін служби

в залежності від напруги та температури гарячої точки для конденсаторів серій LNK-P1X, P2X, P2Z, P2L, P2T, P4X, P5X, P6X, P7X, P8X, P9X

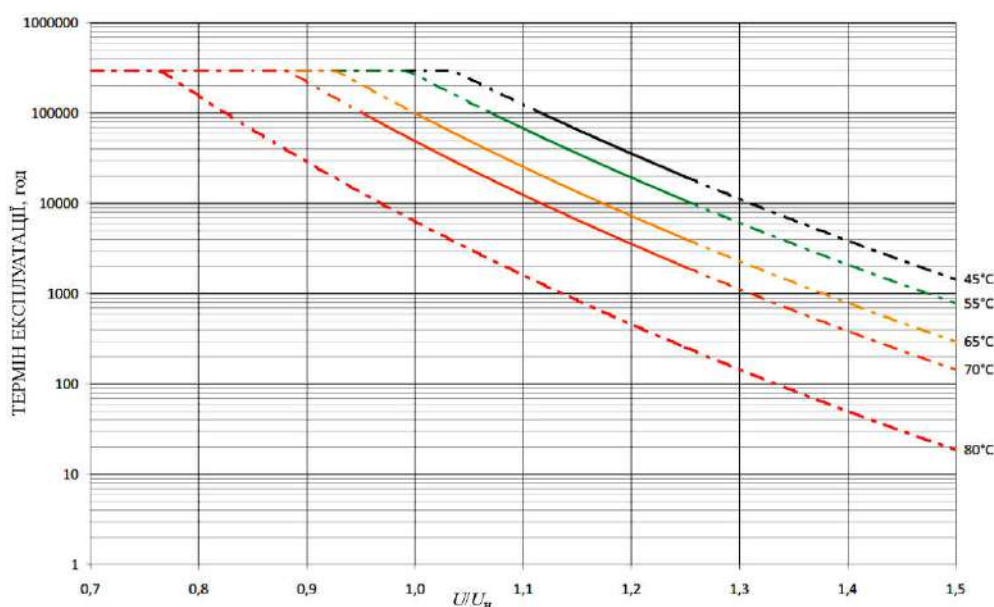


Рисунок 3.4 – Теоретичний очікуваний термін служби

в залежності від напруги та температури гарячої точки для конденсаторів серій LNK-M3, LNK-M2 AND LNK-P3X

Графічне значення номінальної напруги  $U_n$  та напруги пульсацій від піку до піку (перенапруг) згідно з ІЕС 61071, представлено на рис.

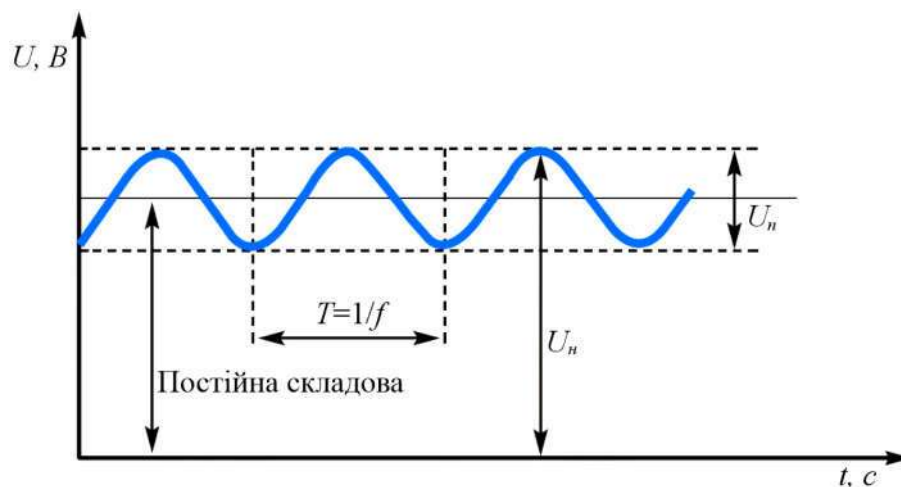


Рисунок 3.5 – Графічне значення номінальної напруги  $U_n$  та напруги пульсацій  $U_n$  згідно з ІЕС 61071

Залежності струму розряду від величини накопиченої енергії  $W_n = (1/2)CU_n^2$  наведено на рис. 3.6, та величини накопиченої енергії від напруги заряду накопичувача – 3.7.

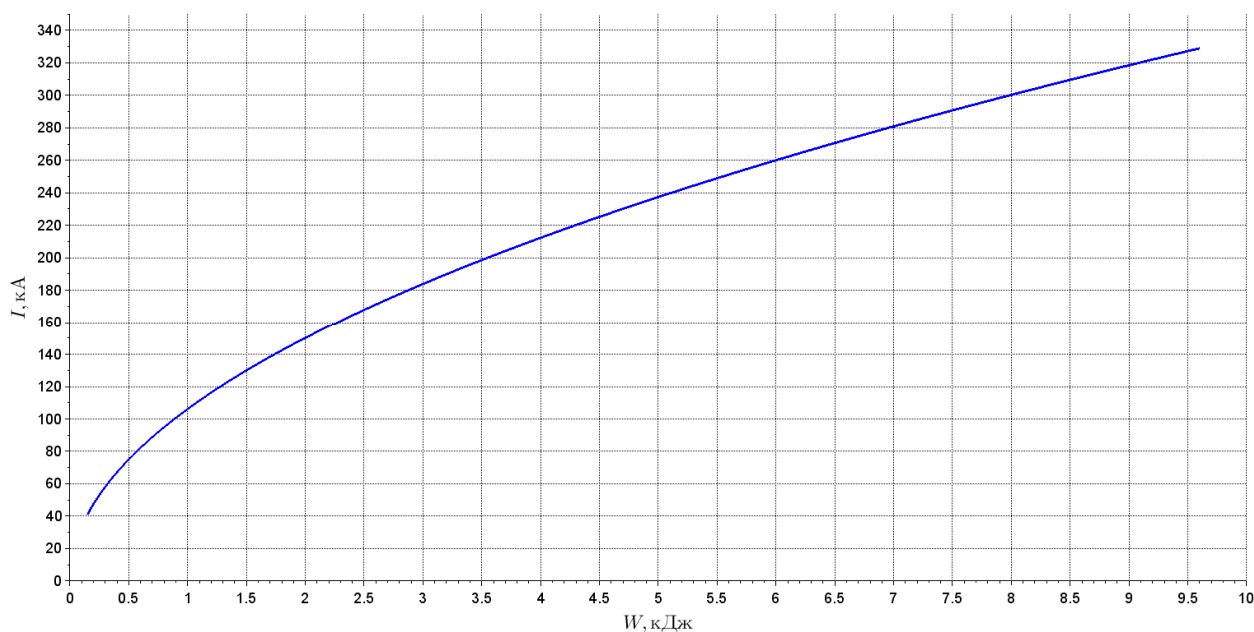


Рисунок 3.6 – Графік залежності струму розряду від величини накопиченої енергії

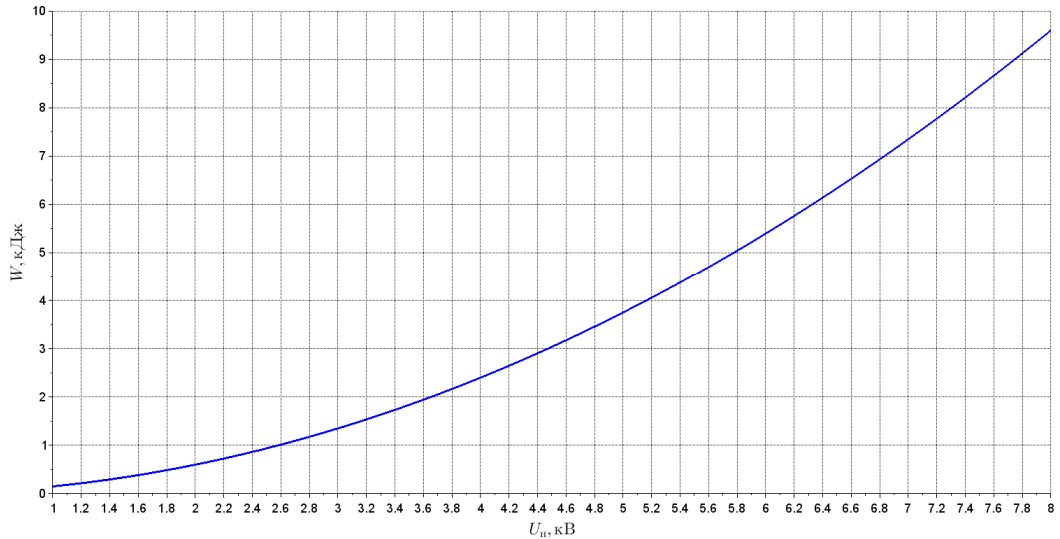


Рисунок 3.7 – Графік залежності величини накопиченої енергії від напруги заряду ємнісного накопичувача

Струм зростає лінійно з напругою, тобто можна вважати, що інтегральний опір розрядного контуру дорівнює  $R = \Delta U / \Delta I \cong 2,9 \cdot 10^{-3}$  Ом (для теоретичних розрахунків обирались значення  $10^{-3}$  Ом), і середня потужність втрат у досліджуваному діапазоні енергій залишаються сталими.

На рис. 3.8 наведено теоретично розраховану залежність густини потоку енергії від накопиченої енергії. Значення розрядного струму при цьому складає  $I_{\delta} \cong 120$  кА (ємність накопичувача  $C=5300$  мкФ, зарядна напруга  $U=1000$  В).

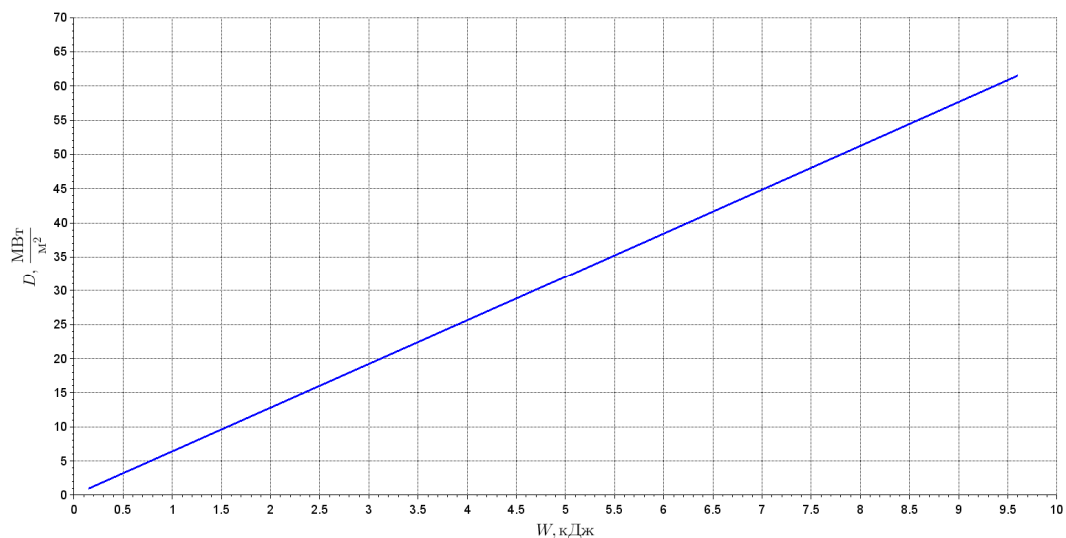


Рисунок 3.8 – Графік залежності густини потоку енергії від накопиченої енергії

При такому струмі магнітний тиск  $p_m = \mu H^2 / 2$  (де  $\mu$  – магнітна проникність,  $H$  – напруженість магнітного поля, створюваного струмом) значно перевищує газокінетичний тиск плазмового стовпчика  $\sim 2nkT$  (де  $n$  – концентрація електронів у розрядному стовпчику,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – температура), що призводить до утворення перетяжок, нестійкості та формуванню плазмового фокуса (ПФ). Саме ПФ являє собою джерело потужного ультрафіолетового джерела випромінювання.

Оцінку температури плазми в області ПФ можна одержати, використовуючи співвідношення Беннета для рівноважного випадку за наявності тільки азимутального магнітного поля, створюваного розрядним струмом [11]:

$$\frac{\mu H_p^2}{2} = 2nkT, \quad (3.13)$$

де передбачається рівномірний розподіл щільності заряджених частинок по перетину плазмового стовпа;  $H_p = I_p / 2\pi r_p$  – магнітне поле на границі плазмового стовпчика радіусом  $r_p$ . Підставляючи типові величини  $r_p = 1$  см,  $n = 5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, отримуємо  $T \cong 1,7 \cdot 10^4$  К. Графік залежності температури  $T$  від розрядного струму  $I_p$  наведений на рис. 3.9.

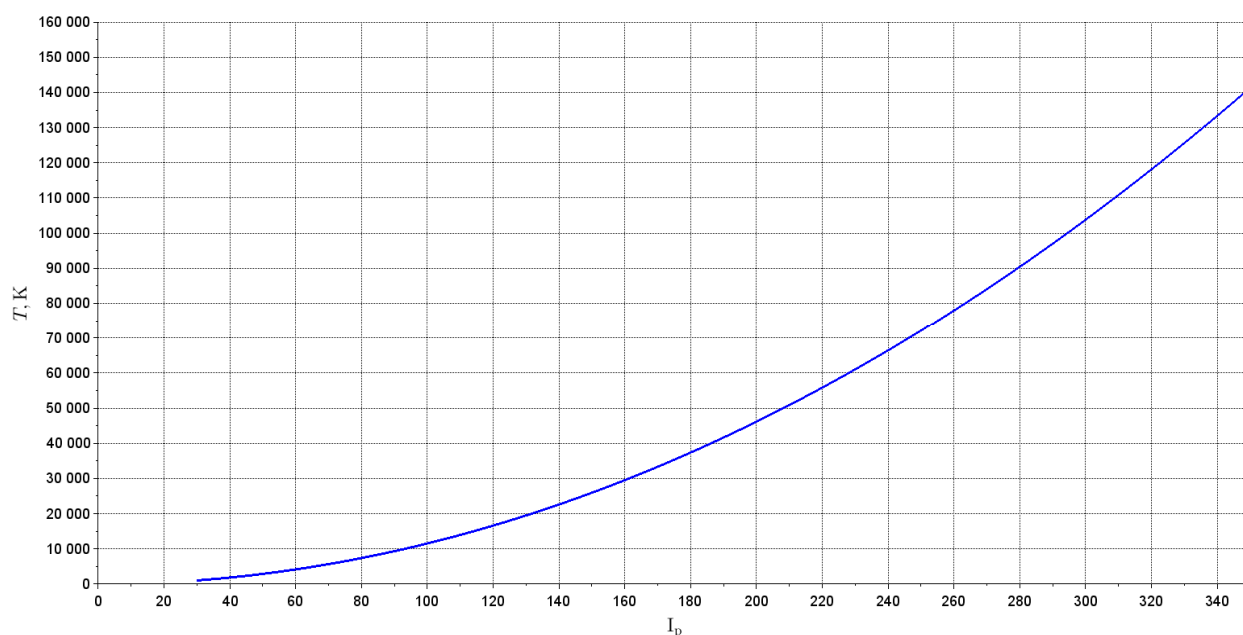


Рисунок 3.9 – Графік залежності температури  $T$  від розрядного струму  $I_p$

Розгляд недоліків та обмежень. Відомо, що ефективність стерилізаційної обробки під дією оптичного випромінювання залежить від потужності випромінювання [8-14]. Теоретичні дослідження, які наведені вище, показали, що підвищення потужності в результаті простого нарощування енергетики генератора призводить до насичення струму на виході накопичувача енергії, і як наслідок, обмеженню виходу випромінювання.

Обмежуючим фактором ефективної роботи магнітоплазмового компресора є індуктивність розрядного контуру, яка також збільшується із підвищенням енергетики установки шляхом нарощування кількості накопичувальних конденсаторів. Перспективним методом обмеження паразитної індуктивності розрядного контуру є здійснення безшинної схеми з'єднання елементів енергетичної установки та випромінювача. Крім того, в якості електронного комутатора та джерела первинної плазми в експериментальній установці необхідне використання швидкодіючого розрядника. Найбільш швидкодіючим на сьогодні є магнітоплазмовий компресор з плазмовою гарматою, що має змогу випромінювати ультрафіолетовий діапазон бактерицидної дії [1-5].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. На основі розробленої математичної моделі генерування широкосмугових імпульсних випромінювань джерелами потужного оптичного випромінювання у складі магнітоплазмового генератора, проведено розрахунки та аналіз енергетичних, часових і температурних процесів. За результатами моделювання розраховані та побудовані часові залежності значень миттєвого струму розряду накопичувача, миттєвої напруги, миттєвої потужності, величини втрат запасеної енергії при розряді конденсатора, отримані ефективні значення втрат запасеної енергії на конденсаторі, величин струму, напруги та потужності для реально обраного ємнісного накопичувача.

2. Одержані значення запасеної реальним ємнісним накопичувачем кількості енергії та пікового струму. Графічне представлення розрядного процесу на основі високострумowego конденсатора демонструє різке наростає струму в момент замикання розрядного проміжку. Максимум досягається на відрізьку часу порядку одиниць мікросекунд. Швидко спадання струму фактично відбувається без виражених коливань, що відповідає режиму, близькому до критичного затухання. Амплітуда піку становить сотні кілоампер, що узгоджується з теоретичними оцінками.

3. Для обраного типу ємнісного накопичувача одержано залежності струму розряду від величини накопиченої енергії та залежності величини накопиченої енергії від напруги заряду. Одержані результати мають високу ступінь кореляції з теоретичними положеннями.

4. На основі отриманого графіку залежності густини потоку енергії від накопиченої енергії, проведена оцінка температури плазми в області плазмового фокусу та повної енергії випромінювання магнітоплазмового компресора. Розрахована температура плазми в області плазмового фокуса становить  $1,7 \cdot 10^4$  °К, а повна енергія випромінювання складає 2,65 кДж.

5. В розділі здійснено розгляд недоліків та обмежуючих факторів підвищення ефективної роботи потужних джерел електромагнітного випромінювання на основі магнітоплазмового компресора. Так, одним із

найбільших обмежуючих факторів є індуктивність розрядного контуру. Зазначено, що перспективним методом зменшення паразитної індуктивності є конструктивний спосіб побудови МПК, а саме застосування безшинної схеми з'єднання силових конденсаторів.

## 4. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ

### 4.1. Відомі найбільш вживані пристрої формування випромінювання ультрафіолетового діапазону.

#### 4.1.1. Лампи для ультрафіолетового знезаражування.

Так, наприклад, відомі лампи для ультрафіолетового знезаражування, що містять колбу з увіолевого скла, усередині якого закріплені електроди, а колба заповнена аргоном з дозованою кількістю ртуті. При подачі достатньої напруги на електроди між ними виникає слабкострумовий дуговий розряд в аргоні, який у міру випаровування ртуті переходить в розряд у парах ртуті, випромінюючи УФ спектр. Однак ККД бактерицидних ламп не перевищує 0,06%.

Недоліками такого рішення є складність стандартизації якості увіолевого скла в процесі його виготовлення та низька пропускна здатність короткохвильового випромінювання в діапазоні від 205 до 280 нм. Крім того, короткий термін служби лампи до втрати своїх бактерицидних властивостей обумовлений низькою стійкістю увіолевого скла до адгезії ртуті та окисним продуктам, що випаровуються з електродів у процесі горіння лампи, які осідають на внутрішню поверхню колби й знижують потужність випромінювання.

Найбільш досконалим рішенням є УФ лампа, будова якої представлена на рис. 4.1. Колба 1 якої виконана із кварцового скла і заповнена інертним газом з дозованою кількістю ртуті, із двома електродними збірками 3, 4 в складі електроду 5 з оксидним покриттям, що знижують роботу виходу електронів, закріпленого між двома ніжками електроду 7. Кожна ніжка електроду 7 з'єднана контактною електродною фольгою 8 з електродним контактом 9, заштампованими в колбу із протилежних кінців по фользі. Електроди електродних збірок 7 виконані з багатоскрученої спіралі 6, а на зовнішню поверхню колби лампи нанесене селективно-проникне кремній-титанове покриття 2. Завдяки удосконаленій конструкції вдалося усунути недоліки

конструкцій ламп, наведених вище, а саме підвищити потужність бактерицидного випромінювання та виключити утворення озону в процесі роботи лампи.

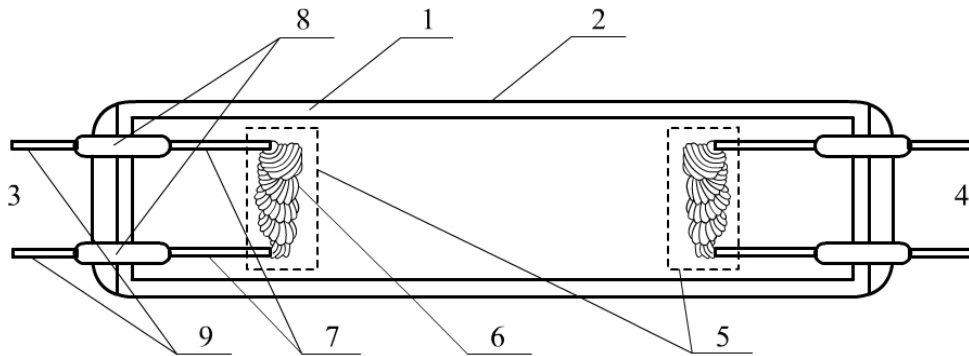


Рисунок 4.1 – УФ бактерицидна лампа:

- 1 – колба; 2 – кремній-титанове покриття; 3, 4 – електродні збірки;  
 5 – електрод; 6 – багатоскручені спіралі; 7 – ніжки електроду;  
 8 – електродна фольга; 9 – електродний контакт

Бактерицидна ефективність ламп залежить, переважно, від дози випромінювання ( $D_{UV}$ , Дж/м<sup>2</sup>), застосованої до мікроорганізмів:

$$D_{UV} = I \cdot t, \quad (4.1)$$

де  $I$  – середня інтенсивність або доза опромінення, Дж/см<sup>2</sup>;  $t$  – час впливу, с.

Коефіцієнт виживання колоній мікробів, підданий впливу бактерицидного опромінення, експоненційно залежить від дози:

$$S = e^{kD_{UV}}, \quad (4.2)$$

де  $k$  – постійна дезактивації (інактивації), що залежить від конкретного виду колоній мікробів м<sup>2</sup>/Дж.

Отриманий коефіцієнт інактивації за один її прохід ( $\eta$ ) через поле випромінювання, використовується як показник загальної ефективності

випромінювання та показує відсоток або частку колоній мікробів, інактивованих після одного проходу через поле опромінення, а також залежить від коефіцієнту  $S$  і завжди менше 1:

$$\eta = I-S. \quad (4.3)$$

Значення параметра  $k$  для багатьох видів бактерій, грибків, цвілі отримуються зазвичай експериментальним шляхом і можуть відрізнятися на кілька порядків. Це пов'язане із методами та умовами проведення вимірів: у повітряному потоці, у воді або на поверхні якої вони проводяться. На показання параметра  $k$  сильно впливає погрішність вимірювання рівня виживання мікробної культури. У зв'язку із цим, вибрати правильне значення  $k$  для умов проектування систем бактерицидного опромінення дуже важко, і, як правило, до застосування рівняння (2) ухвалюється середнє або максимальне з відомих значень  $k$  залежно від цілей знезаражування.

#### **4.1.2. Патентні матеріали в області техніки формування ультрафіолетового випромінювання.**

1. *Європейський патент А61L9/18 № EP0020050A2 “Апарат для очищення повітря за допомогою ультрафіолетового випромінювання”* представлений на рис. 4.2 має наступну будову та принцип дії. Вертикальний корпус (1) містить інфрачервону лампу в нижній частині та принаймні одну ультрафіолетову лампу (3) у верхній частині, вхід (4) та вихід (5) розташовані на нижньому та верхньому рівнях корпусу; корпус сконструйований таким чином, щоб запобігти випромінюванню випромінювання. Дефлектори можуть бути утворені пластинами, прикріпленими до стінки корпусу, щоб повітря рухалося зигзагоподібно та таким чином продовжило період його впливу випромінювання. Кілька апаратів можуть бути з'єднані послідовно.

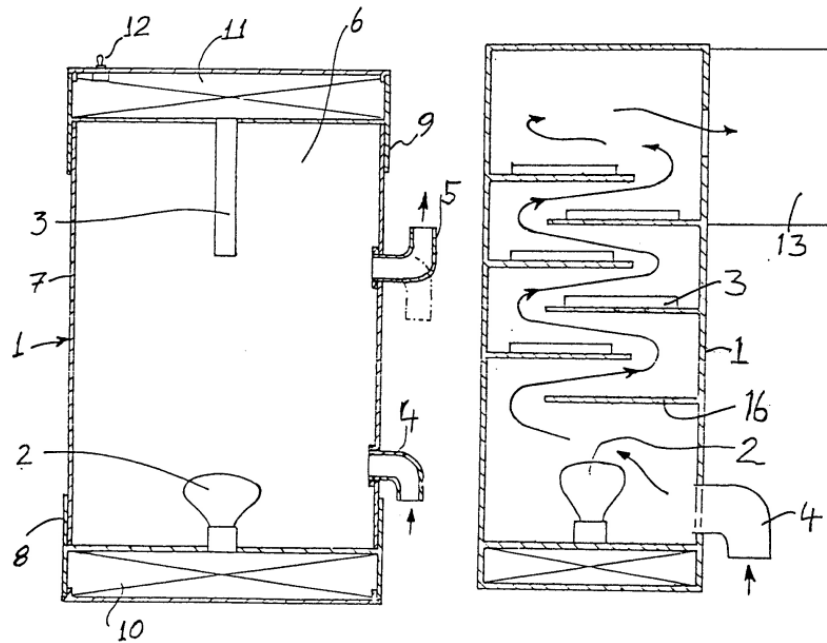


Рисунок 4.2 – Апарат для очищення повітря за допомогою ультрафіолетового випромінювання за європейським патентом № EP0020050A2

В іншому варіанті виконання (рис. 4.3) інфрачервона або люмінесцентна лампа екранується від ультрафіолетового випромінювання, за винятком випадків, коли світло випромінюється на невідбивну частину опори. Під час використання повітря конвекцією або примусовим втягуванням піддається ультрафіолетовому випромінюванню, яке знищує мікроби та розкладає зважені частинки.

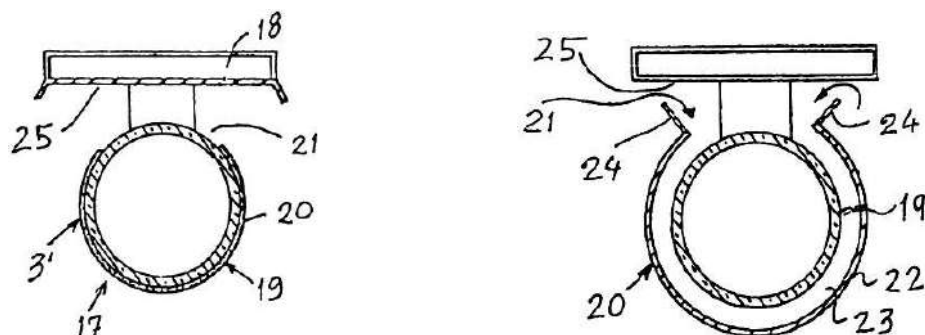


Рисунок 4.3 – Варіація апарату для очищення повітря за допомогою ультрафіолетового випромінювання за європейським патентом

№ EP0020050A2

2. Американський патент H01S3/02 № 3.789.321 "Газова лазерна система з електронно-променевою накачкою".

Рисунок 4.4, частково в поперечному перерізі, ілюструє варіант реалізації винаходу; а рис. 4.5 схематично представляє електронну частину системи. Газова лазерна система з ініціюванням та підтримкою електронним променем, здатна створювати рівномірні, високоенергетичні електричні розряди великого об'єму в газоподібному середовищі для генерації високого тиску. Тонке металеве вікно відділяє резонатор електронної гармати низького тиску від поздовжньо паралельного газового резонатора високого тиску, таким чином, що інжектвані первинні електрони створюють вторинні електрони низької енергії, які переміщуються через газовий резонатор прикладеним електричним полем, що зіштовхує в газовому середовищі. Система застосовна як у конфігурації генератора, так і в підсилювачі, і здатна, наприклад, створювати короткий ( $t_p=1$  нс) імпульс  $\text{CO}_2$ -лазера енергією 10 Джоулів/літр активного об'єму, при цьому вона може працювати в зоні присутності людей завдяки електрично нейтральному корпусу.

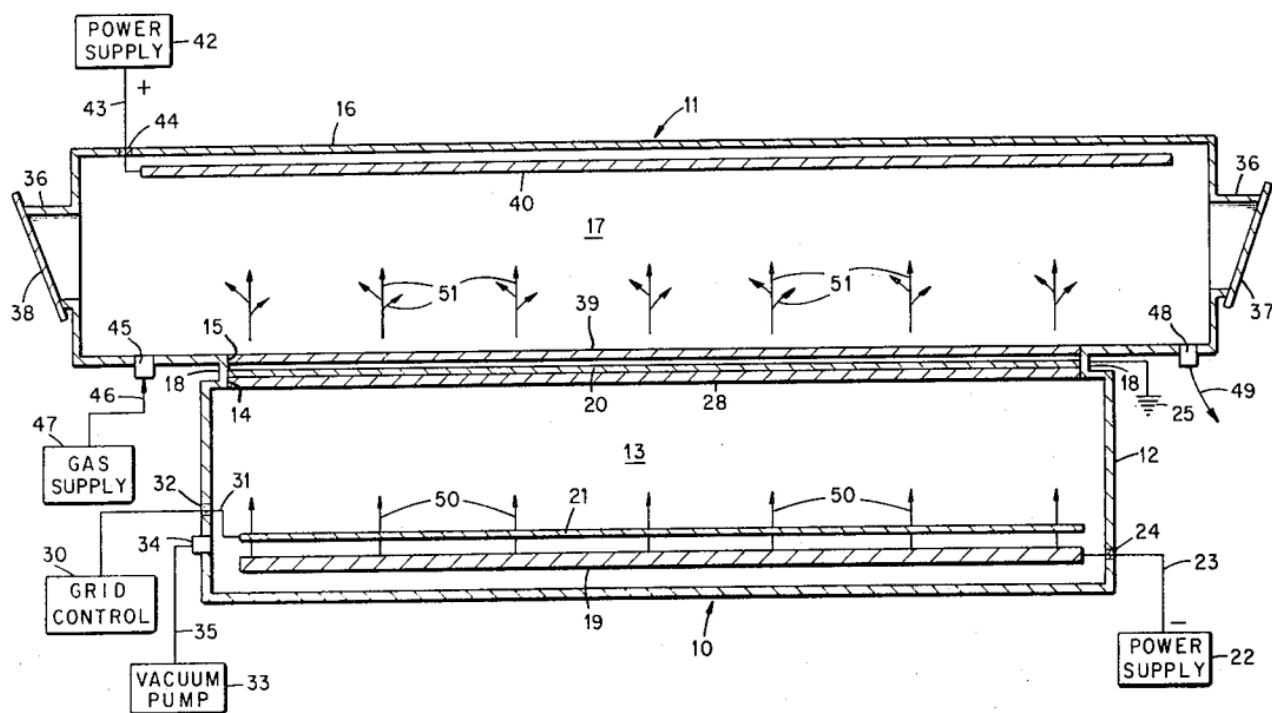


Рисунок 4.4 – Газова лазерна система з електронно-променевою накачкою за американським патентом № 3.789.321

Відомо, що великі об'єми газоподібного лазерного середовища високого тиску можуть бути накачані до високої щільності інверсії шляхом інжекції електронного променя з щільністю, що перевищує кілька міліампер на квадратний сантиметр, та з енергіями від зовнішнього джерела, достатньо великими для створення суттєво рівномірного збудження [ ].

Конфігурація підсилувача в основному складається з електронної гармати з гарячим катодом та газового лазерного підсилувача, позначених загалом поз. 10 та 11 відповідно. Електронна гармата 10, здатна видавати енергію електронів понад 200 кеВ та густину струму понад 200 мА/см<sup>2</sup>, містить корпус або кожух 12 та камеру 13 з поздовжнім отвором 14, що прилягає до поздовжнього отвору 15 у контейнері 16, що визначає в ньому порожнину або камеру 17, причому корпус 12 та посудина 16 з'єднані між собою фланцем 18.

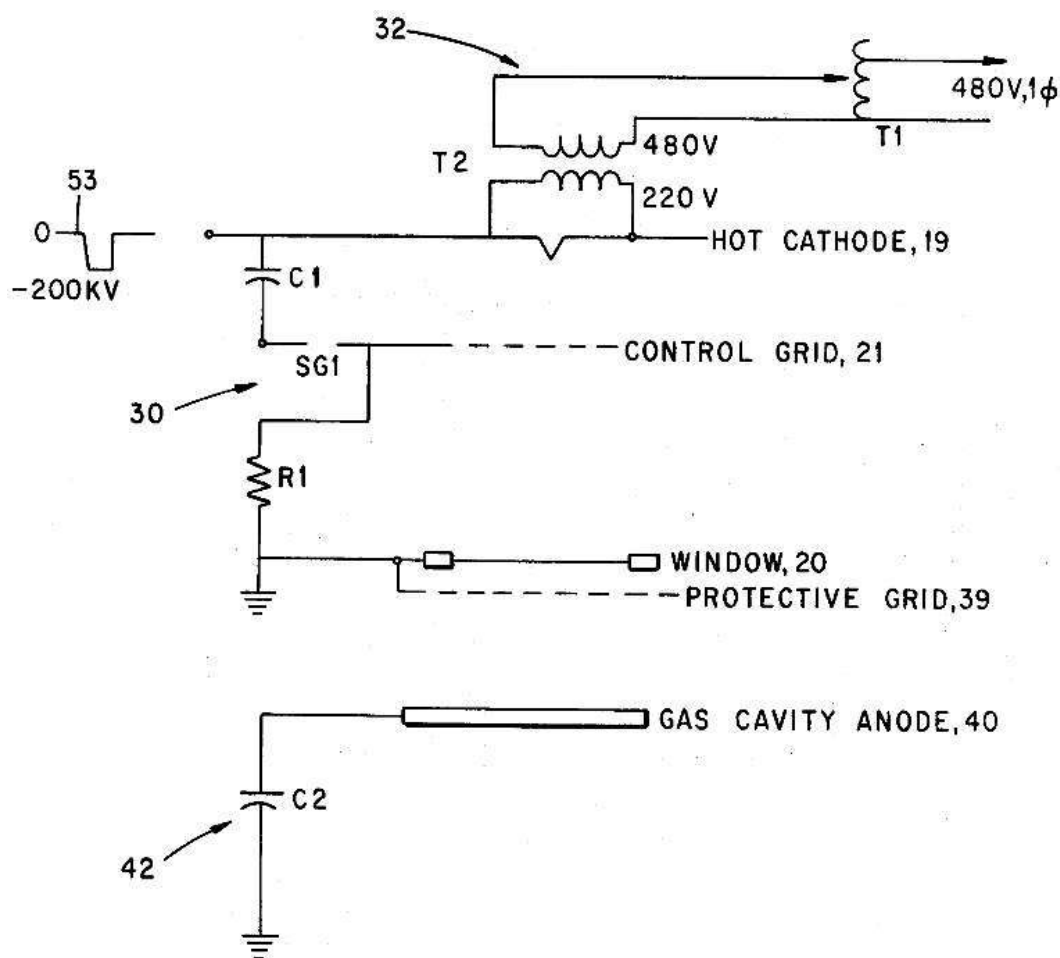


Рисунок 4.5 – Газова лазерна система з електронно-променевою накачкою за американським патентом № 3.789.321

Зрозуміло, що корпуси 12 та 16 є електрично нейтральними та можуть бути нерозривними, якщо це необхідно, і можуть бути, наприклад, виготовлені з нержавіючої сталі. У цьому варіанті реалізації електронна гармата є тріодною лампою живлення, що складається з катода 19, анода 20 та керуючої сітки 12. Катод 19, наприклад, може складатися зі 100 дротів з чистого вольфраму довжиною 20 см, розташованих на відстані 1 см один від одного для досягнення активної довжини 100 см, і підключений до джерела живлення 22 через провід 23, який проходить через ізоляційне ущільнення або прохідний елемент 24 в корпусі 12 і є електрично від'ємним відносно землі, причому джерело живлення 22 має напругу, наприклад, від -100 кВ до -2 МВ (в даному варіанті реалізації використовується напруга -200 кВ).

#### **4.1.3. Ексімерні лазери.**

Ексімерні лазери – один із найцікавіших видів лазерів. Випромінювання джерел, що належать до цього виду, спектральному діапазоні займає проміжок від 126 нм до 558 нм. Завдяки такій малій довжині хвилі випромінювання ексімерних лазерів може бути сфокусоване на пляму дуже маленького розміру. Потужність цих джерел сягає одиниць кВт. Ексімерні лазери відносяться до імпульсних джерел. Частота повторення імпульсів може сягати 500 Гц. Цей вид лазерів має дуже високий квантовий вихід і, як наслідок, досить високий ККД (до 2 – 4%). Завдяки таким незвичайним характеристикам, випромінювання ексімерних лазерів знаходить широке застосування.

Однак, всі ці чудові характеристики ексімерних лазерів спричиняють деякі труднощі при їх виготовленні та створенні установок на їх основі. Наприклад, при такій високій потужності випромінювання необхідно перешкоджати утворенню дуги в активній газовій суміші. Для цього необхідно ускладнити механізм накачування з метою скорочення тривалості імпульсу. Короткохвильове випромінювання ексімерних лазерів вимагає використання спеціальних матеріалів та покриттів у конструкціях резонаторів, а також в оптичних системах для перетворення їхнього випромінювання. Тому одним із

недоліків джерел цього виду є висока, в порівнянні з іншими видами лазерів, вартість.

Ексимерні лазери – це тип ультрафіолетових (УФ) газових лазерів, які використовують ексимери (нестійкі молекули, що існують лише в збудженому стані) як робоче тіло. Вони генерують інтенсивне імпульсне випромінювання з високою точністю. Це так звані "холодні" лазери, що працюють в ультрафіолетовому діапазоні та являються сучасними достатньо поширеним медичним обладнанням. Принцип роботи ексимерного лазера ґрунтується на явищі вимушеного випромінювання. Відмінність полягає у використанні суміші інертного газу (наприклад, аргону, криптону, ксенону) та галогену (фтору або хлору). Електричний розряд високої потужності збуджує суміш газів, внаслідок чого утворюються короткоживучі збуджені молекули – ексимери наприклад, ArF, KrF, XeCl). Ці ексимери дуже швидко розпадаються, випускаючи фотони ультрафіолетового світла певної, дуже точної довжини хвилі (наприклад, 193 нм для ArF, 248 нм для KrF, 308 нм для XeCl). Це випромінювання підсилюється в оптичному резонаторі, формуючи потужний, монохроматичний і сфокусований УФ-промінь. Переваги: висока точність та контроль над глибиною проникнення, мінімальний вплив на навколишні здорові тканини, швидкість процедур та видимі результати.

Активним середовищем ексимерного лазера є молекули газу. Але, на відміну від лазерів на CO, CO<sub>2</sub> або N<sub>2</sub>, генерація в ексимерних лазерах відбувається не на переходах між різними коливально-обертальними станами, а між різними електронними станами молекул. Існують речовини, які в основному стані не можуть утворювати молекули (їх частки у незбудженому стані існують лише у мономерній формі). Це відбувається, якщо основний стан речовини відповідає взаємному відштовхуванню атомів, є слабозв'язаним, або пов'язаним, але за наявності великих міжядерних відстаней.

Молекули робочої речовини ексимерних лазерів грубо можна розділити на два види: утворені частинками однієї й тієї ж речовини та частинками двох різних речовин. Відповідно до цього самі активні середовища можна назвати "ексимери" (excimer, excited dimer – збуджений димер) та "ексиплекси"

(exciplex, excited complex – збуджений комплекс). Процес отримання генерації в ексимерному лазері зручно розглянути за допомогою рисунка 4.6, на якому представлені криві потенційної енергії для основного та збудженого станів двоатомної молекули  $A_2$ .

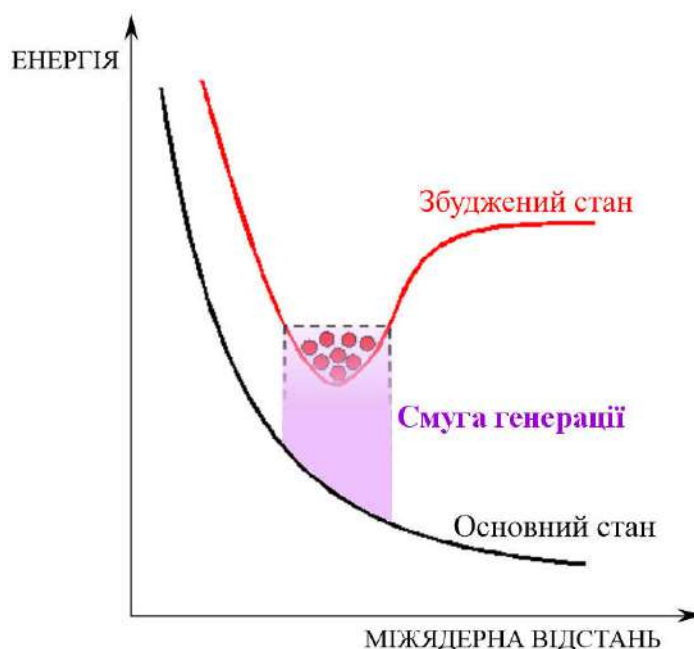


Рисунок 4.6 – Енергетичні рівні ексимерного лазера

Оскільки крива потенційної енергії збудженого стану має мінімум, молекула  $A_2$  може існувати. Ця молекула є ексимером. У процесі релаксації збудженого середовища встановлюється певна траєкторія потоку енергії, що містить стрибок, що долається тільки випромінюванням. Якщо в певному обсязі накопичити досить велику кількість таких молекул, то на переході між верхнім (пов'язаним) та нижнім (вільним) рівнями можна отримати генерацію (вимушене випромінювання) – пов'язано-вільний перехід. Цей перехід характеризується такими важливими властивостями:

- при переході молекули до основного стану в результаті генерації вона негайно дисоціює;
- не існує чітко виражених обертально-коливальних переходів і перехід є відносно широкосмуговим;
- якщо інверсія не досягається, то спостерігається флюоресценція.

Якщо нижній стан є слабо пов'язаним, то молекула в цьому стані зазнає швидку дисоціацію або сама (предисоціація), або внаслідок першого ж зіткнення з іншою молекулою газової суміші. В даний час отримано лазерну генерацію на ряді ексимерних комплексів – квазімолекулах благородних газів, їх окислах і галогенідах, а також парах металевих сполук. Довжини хвиль генерації цих активних середовищ наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Зведена таблиця параметрів ексимерних сполук

Ексимерні комплекси	Квазімолекули благородних газів			Окиси благородних газів			Пари металічних сполук
	Xe <sub>2</sub>	Kr <sub>2</sub>	Ar <sub>2</sub>	ArO	KrO	XeO	
Активна квазімолекула							CdHg
λ <sub>ген</sub> , нм	172	145,7	126	558	558	540	470
Δλ, нм	20	13,8	8			25	
P <sub>імп</sub> , МВт	75		50				
τ, нс	10	10	4-15				
Активна квазімолекула	XeBr	XeF	ArF	ArCl	XeCl	KrCl	KrF
λ <sub>ген</sub> , нм	282	351	193	175	308	220	248
Δλ, нм	1	1,5	1,5	2	2,5	5	4
P <sub>імп</sub> , МВт (P <sub>ср</sub> , Вт)	(100)	3	1000	(0,02)	(7)	5 (0,05)	1000
τ, нс	20	20	55	10	5	30	55

Для отримання квазімолекул благородних газів використовуються чисті гази, що знаходяться під тиском у десятки атмосфер; для одержання оксидів благородних газів – суміш вихідних газів з молекулярним киснем або сполуками, що містять кисень, у співвідношенні 10000: 1 під таким самим тиском; для одержання галогенідів благородних газів – їх суміші з галогенами у співвідношенні 10000: 1 (для аргону та ксенону) або 10: 1 (для ксенону або криптону) при загальному тиску 0,1-1 МПа.

Прикладом ексимерної лазерної установки може служити *Excilite μ*, яка використовує монохроматичне (одноколірне) УФ випромінювання довжиною хвилі 308 нм, ефективно лікуючи шкірні захворювання, такі як псоріаз, вітиліго, atopічний дерматит та екзему, поєднуючи переваги лазерів та традиційної фототерапії, але з більшими ділянками обробки, меншою тривалістю сеансів та меншими побічними ефектами (рис. 4.7).



Рисунок 4.7 – Ексимерна лазерна установка Excilite μ

Ключові особливості:

- довжина хвилі: 308 нм (XeCl ексимерний лазер);
- можливість обробки до 30 см<sup>2</sup> за один раз, що скорочує час сеансу;
- захист здорової шкіри навколо ураженої ділянки завдяки фільтрам, що знижує ризик опіків;
- не потребує застосування ліків;
- ефективне лікування псоріаз, вітиліго, atopічний дерматит, екзема, alopecія та інш.;
- позитивний результат часто помітний вже після першого сеансу.

#### 4.1.4. Плазмові випромінювачі.

Потужнішим джерелом ультрафіолету є газорозрядна низькотемпературна плазма ( $T \sim 10^4$  K). Інтенсивне УФ випромінювання безперервного спектру випускає електрони в прискорювачі за рахунок магнітотормозного випромінювання релятивістських заряджених часток в однорідному магнітному полі. Пристрої для одержання потоків плазми називають плазмовими прискорювачами (ПП) – це клас плазмодинамічних пристроїв для одержання потоків плазми з енергією іонів від 10 еВ і вище. На відміну від прискорювачів заряджених часток, у каналі ПП перебувають одночасно частки із зарядами обох знаків – позитивні іони та електрони. Це дозволяє одержувати квазістаціонарні (тривалістю від  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  с) плазмові потоки з ефективним струмом іонів порядку мільйонів Ампер при енергії часток порядку 100 еВ [15-18].

Напрямок розвитку плазмових випромінювачів визначається трьома завданнями:

- досягнення високих яскравостей;
- отримання інтенсивних світлових потоків;
- збільшення повної енергії випромінювання.

В даний час кожне з цих завдань вирішується, але окремо. Так, збільшення тривалості не представляє особливої складності в безперервних джерелах. При цьому яскравості, що реалізуються і площі випромінюючих поверхонь невеликі (стаціонарно палаючі дуги). Імпульсні джерела з великими розмірами випромінюючої поверхні і значними тривалостями світлових імпульсів (термохімічні генератори, плазмові струмені, що витікають в повітря) мають невисокі яскравості [15].

Порівняно високими яскравостями володіють випромінювачі з малими поверхнями (іскра, капілярний розряд, магнітоплазмовий компресор) і короткими світловими імпульсами (ударні хвилі, іскрові розряди, шаровий імпульсний розряд).

На сьогодні найбільш широке поширення одержали ті ПП у яких прискорення та створення плазми здійснюються за рахунок електричної енергії за допомогою електричного розряду (рис. 4.8) [15-18].

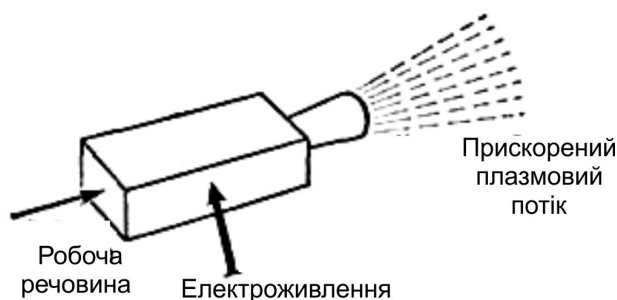


Рисунок 4.8 – Схема плазмового прискорювача

При аналізі робочого процесу в ПП випромінювану плазму можна розглядати як суцільне середовище і як сукупність часток (іонів і електронів). У рамках першого підходу прискорення плазми обумовлене перепадом повного (іонного та електронного) тиску  $p=p_i + p_e$  і дією сили Ампера  $FA$  виникаючої при взаємодії струмів, що течуть у плазмі з магнітним полем:

$$FA \sim [jb], \quad (4.4)$$

де  $j$  – щільність струму в плазмі,

$B$  – індукція магнітного поля.

У рамках другого підходу прискорення іонів пояснюється:

- 1) дією електричного поля  $E$ , що існує в плазмовому об'ємі;
- 2) зіткненнями спрямованого потоку електронів з іонами;
- 3) зіткненнями іонів з іонами, завдяки яким енергія хаотичного руху іонів переходить в енергію спрямованого руху (теплове або газодинамічне прискорення іонів).

Найбільше значення для ПП має електричне прискорення іонів, менше – два останні механізми. Створення електричного поля в плазмі, що містить

рухомі електрони, загалом кажучи, складне завдання. Із узагальненого закону Ома

$$j / \sigma = \frac{\nabla p_e}{en} + E + \frac{1}{c} [v_c H] \quad (4.5)$$

видно, що для існування електричного поля в плазмі потрібно мати або великий опір, або більші градієнти  $p_e$  (реально – більшу електронну температуру), або магнітне поле та дрейф електронів. Для ПП важливі два останні механізми.

Плазмові прискорювачі діляться на теплові та електромагнітні залежно від того, що переважає в процесі прискорення: перепад повного тиску  $p$  або сила Ампера.

Конструктивно стаціонарний неізотермічний прискорювач, у якого  $P_e > P_i$ , представляє собою "магнітне сопло", в якому або шляхом інжекції швидких електронів, або шляхом електронного циклотронного резонансу створюють плазму з гарячими електронами ( $10^7 \leq T_e \leq 10^9$  °C) або в енергетичних одиницях:  $10^3 \leq kT_e \leq 10^5$  еВ. Електрони, прагнучи покинути камеру, створюють об'ємні заряди, електричне поле яких прискорює іони, віддаючи їм енергію порядку  $kT_e$ .

Потужноструміві ПП можна зробити стаціонарними (працюючими в безперервному режимі), якщо підтримувати напругу та безперервно подавати між електродами робочу речовину. Для оптимізації процесу у випадку роботи на газі канал треба робити змінної ширини (рис. 1.4,а). Якщо анод зробити суцільним, то при постійній подачі робочої речовини та безперервному збільшенні розрядного струму  $I_p$  швидкість витікання плазми і ККД прискорювача спочатку будуть рости (зменшується питома вага витрат на іонізацію, що нагріває плазму й втрати на стінки). Однак при деякому значенні  $I_p$  відбувається винос великої частини розрядного струму за зріз прискорювача, напруга різко зростає, падає ККД, у прискорювачі виникають коливання. Наступає так званий критичний режим. Його фізичною

причиною є збіднення іонами прианодної області, що відбувається під дією об'ємного електричного поля. Такий критичний режим найбільш ефективно усувають подачею частини робочої речовини через анод (перехід у режим "іонного струмоперенесення"), для чого використовують не суцільний, а пористий або стрижневий анод. Найбільш, часто така схема застосовується у квазістаціонарних ПП, що працюють при потужностях  $\sim 10^8$  Вт із тривалістю імпульсу  $\sim 1$  мс [10-13].

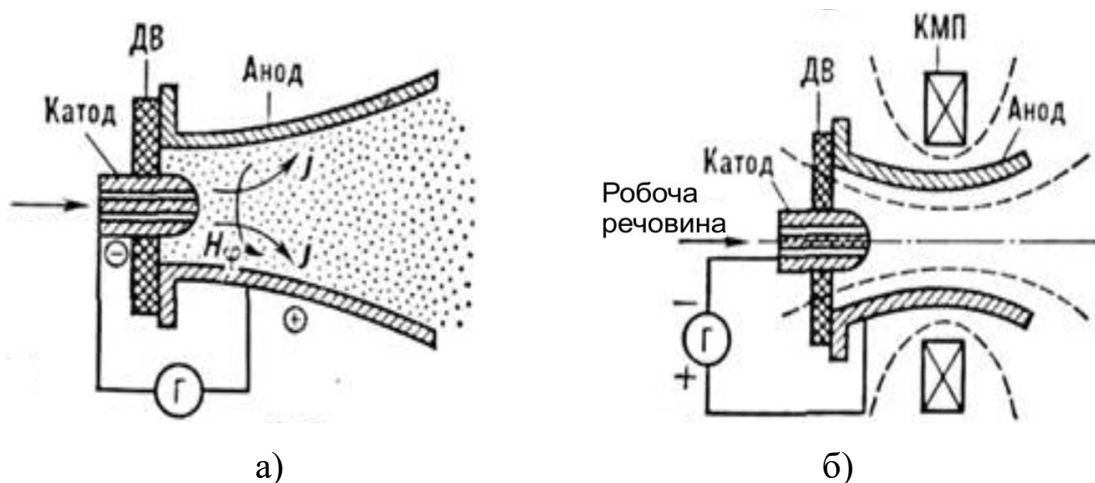


Рисунок 4.9 – Стаціонарні потужнострумкові плазмові прискорювачі:  
а) схема торцевого плазмового прискорювача; б) схема торцевого  
магнітоплазмового прискорювача

ДВ – діелектрична вставка; КМП – котушка магнітного поля

## 4.2. Імпульсний магнітоплазмовий компресор випромінювання ультрафіолетового діапазону.

### 4.2.1. Будова та опис конструкції магнітоплазмового випромінювача.

Як було сказано вище, відома велика кількість різноманітних за дією пристроїв знезараження повітря. Однак, найбільш перспективними слід вважати плазмові випромінювачі [1, 2], в яких надпотужним джерелом ультрафіолету є газорозрядна низькотемпературна плазма ( $T \sim 10^4$  К). Інтенсивне УФ випромінювання безперервного спектру випускає електрони в

прискорювачі за рахунок магнітотормозного випромінювання релятивістських заряджених часток в однорідному магнітному полі. Пристрої для одержання потоків плазми називають плазовими прискорювачами (ПП) – це клас плазодинамічних пристроїв для одержання потоків плазми з енергією іонів від 10 eV і вище. На відміну від прискорювачів заряджених часток, у каналі ПП перебувають одночасно частки із зарядами обох знаків – позитивні іони та електрони. Це дозволяє одержувати квазістаціонарні (тривалістю від  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  с) плазові потоки з ефективним струмом іонів порядку мільйонів Ампер при енергії часток порядку 100 eV [2].

Напрямок розвитку плазових випромінювачів можна охарактеризувати трьома завданнями:

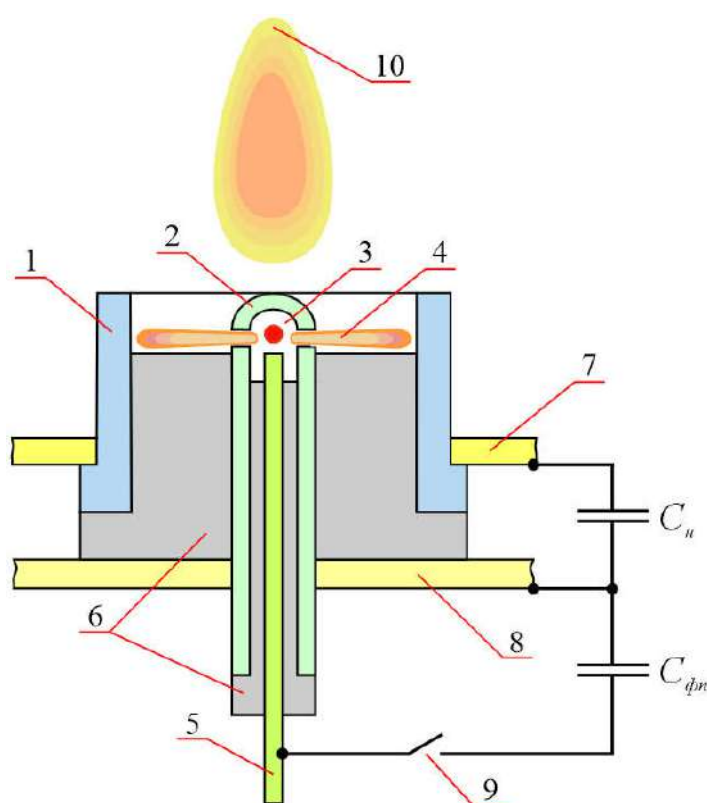
- досягнення високих яскравостей;
- отримання інтенсивних світлових потоків;
- збільшення повної енергії випромінювання.

Найбільш перспективним для антибактеріальної та стерилізаційної обробки об'єктів різної фізичної природи є використання імпульсних оптичних джерел випромінювання ультрафіолетового діапазону, які є високоефективними стерилізаторами в широкій області застосувань. В основу таких джерел покладені коаксіальні плазові прискорювачі торцевого типу (магнітоплазові компресори – МПК), які працюють в імпульсному режимі. Джерелом енергії таких стерилізаторів є ємнісний накопичувач, що дозволяє генерувати струми порядку від  $10^5$  до  $10^6$  А при напрузі від 1 до 10 кВ [1, 2].

За рахунок істотного збільшення потужності УФ випромінювання такі стерилізатори мають ряд переваг у порівнянні із бактерицидними ртутними лампами, які широко використовуються в даний час.

Магнітоплазовий компресор (МПК) працює в режимі періодично повторюваних атмосферних розрядів. Внаслідок таких розрядів утворюються згустки ударно-зжатої плазми, що є джерелом потужного УФ випромінювання. За рахунок істотного збільшення потужності УФ випромінювання такі стерилізатори мають ряд переваг у порівнянні із бактерицидними ртутними лампами.

Схема коаксіального прискорювача плазми наведена на рис. 4.10. Магнітоплазмовий компресор (МПК) працює таким чином. Через отвори в центральному електроді 2 відбувається напуск плазми (форплазми) у торцеву область МПК 3. При замиканні ключа 9 починається розряд ємнісного накопичувача  $C_n$  через плазмові перемички 4. Розряд у початковій стадії має поверхневий характер з частковою ерозією та іонізацією матеріалу діелектричної втулки.



1 – зовнішній електрод; 2 – центральний електрод; 3 – камера формування форплазми; 4 – плазмові струмені; 5 – додатковий електрод;  
6 – фторопластові ізолятори; 7 – листовий електрод накопичувача (анод);  
8 – листовий електрод накопичувача (катод); 9 – розрядник; 10 – плазмовий фокус

Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд МПК з напуском форплазми

В міру зростання струму відбувається відрив ліній струму від поверхні діелектрика 6 і утворення струмово-плазмової оболонки у вигляді плазмового

конуса 10 із надзвуковою швидкістю. Утворюється сконцентрований низькотемпературний плазмовий фокус у вигляді області ударно стисненої плазми в торцевій частині прискорювача, що власне і являє собою джерело потужного імпульсного електромагнітного випромінювання.

У запропонованій установці з генерації та прискорення щільної плазми для енергоживлення використовується потужний ємнісний накопичувач, схема якого представлена на рис. 4.11. Максимальна величина струму обмежується впливом індуктивності конденсаторів ( $C_n$  і  $C_{fn}$ ) і паразитної індуктивності монтажу  $L$  (шинопроводів, які зв'язують електроди конденсаторів і плазмового прискорювача). Мінімізація індуктивності дозволяє реалізувати режим розряду накопичувача, близький до аперіодичного, і наблизитися до максимально можливих величин розрядних струмів експериментальних установок. Процес утворення плазми та її характеристик визначаються, крім того, параметрами плазмостворюючої речовини.

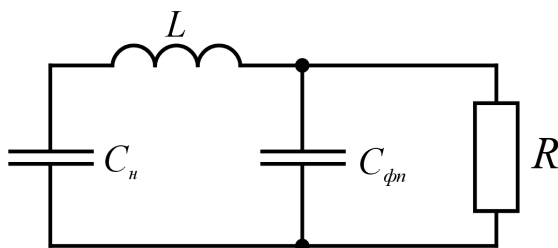


Рисунок 4.11 – Спрощена схема МПК

Схема електрична структурна запропонованого магнітоплазмового компресора представлена на рис. 4.12. Вона складається з наступних елементів:

- універсальний блок живлення та контролер акумулятора;
- акумулятор;
- блок накачування та контролю заряду;
- батарея силових конденсаторів;
- генератор форплазми;
- магнітоплазмовий компресор (розрядник форплазми, розрядник силовий);

- блок керування та контролю;
- реле саморозряду;
- модуль дистанційного керування.

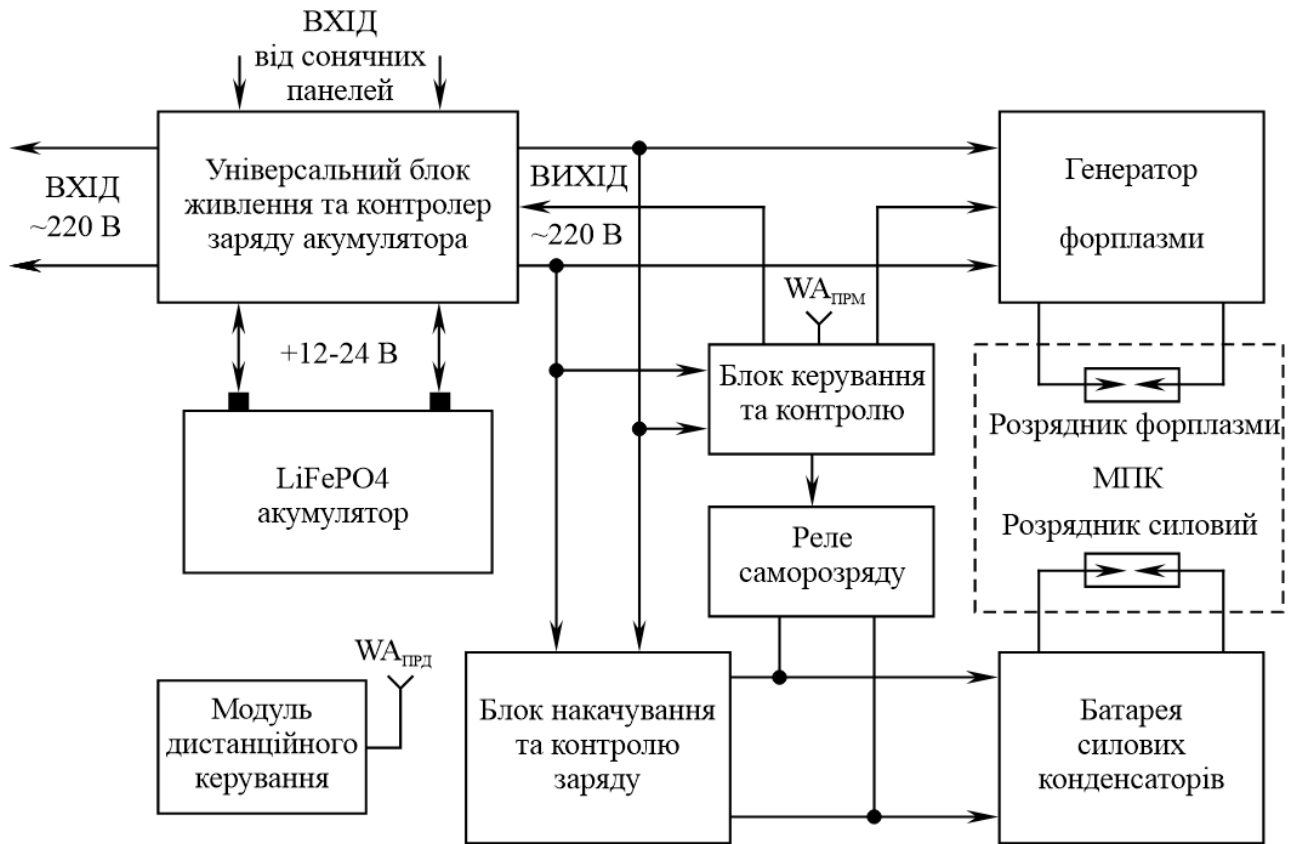


Рисунок 4.12 – Схема електрична функціональна МПК

МПК працює наступним чином. Універсальний блок живлення та контролер аккумулятора побудований за сучасною схемою із врахуванням потреб пристрою. Універсальність полягає в можливості житися від різноманітних джерел. Так, при роботі в стаціонарних умовах, він може житися від мережі  $\sim 220$  В. А в польових умовах або при відсутності електроенергії – за допомогою аккумулятора або сонячні батареї. Сучасна промисловість випускає як стаціонарні, так і переносні комплекси сонячних елементів, рис. 4.13. Стаціонарні варіанти мають потужність 400-600 Вт на одну сонячну панель, чого повністю вистачає для накачування заряду батареї силових конденсаторів МПК. Прикладами можуть служити гібридний комплект

Midea Solaris H50 Гібрид + сонячна панель (рис. 4.13, а) або сонячна панель LONGI Solar Hi-MO 7 LR5-72HGD-600M Bifacial ((рис. 4.13, б).

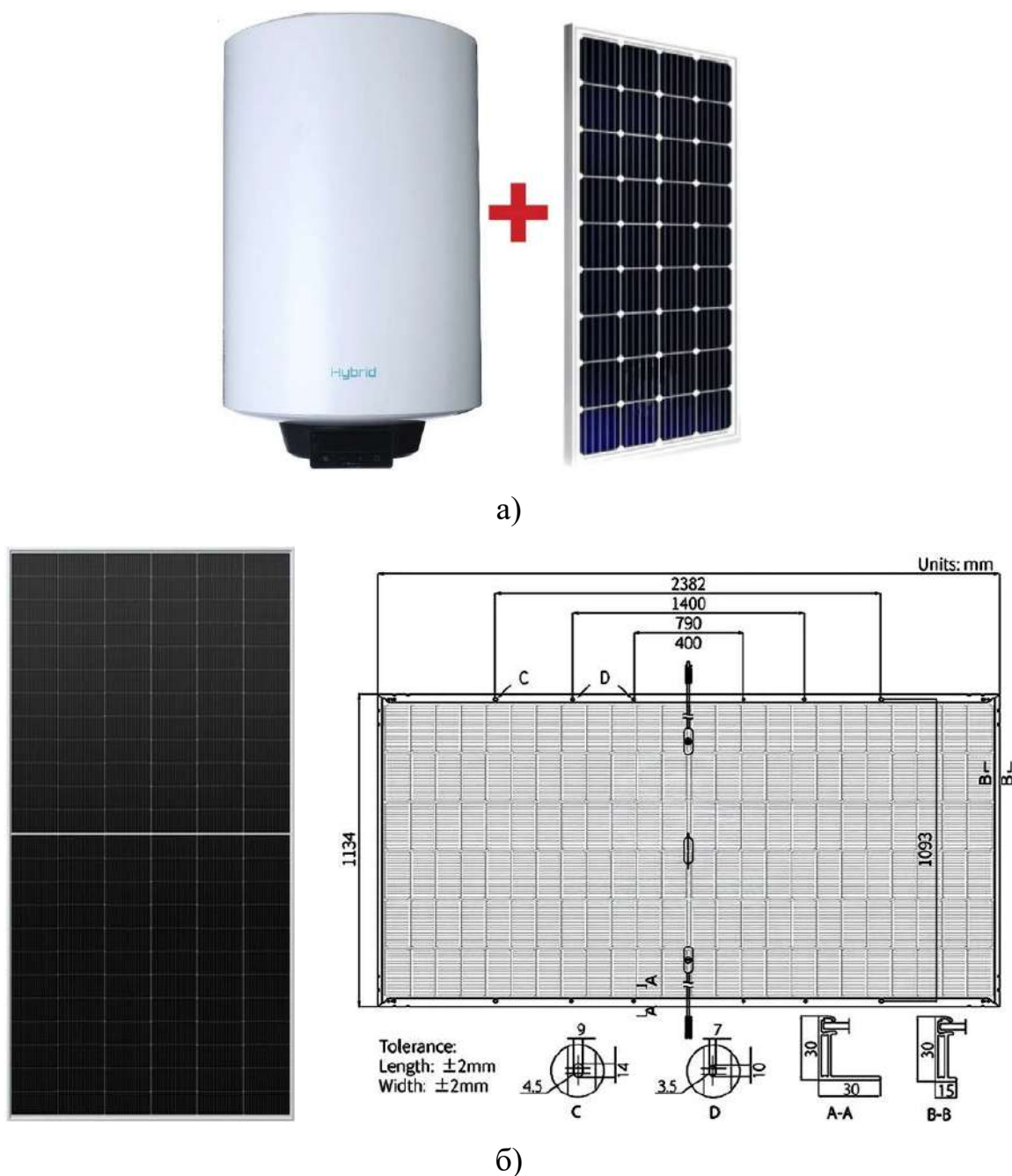


Рисунок 4.13 – Приклади стаціонарних сонячних елементів:

- а) гібридний комплект Midea Solaris H50 (бойлерний нагрівач і сонячна панель); б) сонячна панель LONGI Solar (600 Вт)

Так, сонячна панель Hi-MO 7 від LONGI Solar має потужність 600 Вт, що робить її однією з найефективніших моделей на ринку. Це означає, що вона здатна генерувати більше енергії за менших розмірів, що дозволяє економити

простір і знижувати витрати на інсталяцію, що стало можливим завдяки біфакційній технології. Біфакційні панелі здатні збирати енергію не тільки від прямого сонячного світла, а й від світла, що відбивається від землі або інших об'єктів.

Іншим, альтернативним джерелом живлення є акумулятор. В принципі це може бути акумулятор будь-якого типу, але найбільш поширеним типом з високою щільністю енергії є технологія LiFePO<sub>4</sub>. Акумулятори типу LiFePO<sub>4</sub> випускаються у найрізноманітніших форм-факторах: призматичному, циліндричному та пакетному (pouch) (рис. 4.14).

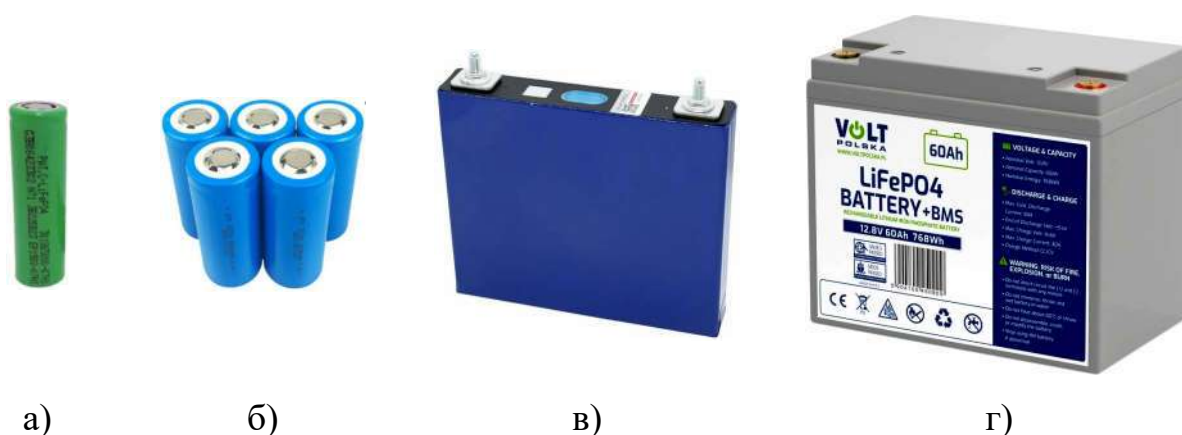


Рисунок 4.14 – Приклади акумуляторів LiFePO<sub>4</sub>:

а) в корпусі 18650; б) в корпусі 32700; в) FP EVE LF50F; г) збірка 12 В, 60 А·h;

Циліндричні елементи (рис. 4.14, а, б) за формою нагадують традиційні батарейки (наприклад, розміри 18650, 21700, 4680). Вони мають міцний металевий корпус. Перевагами є висока механічна міцність та довговічність, а також краще розсіювання тепла завдяки проміжкам між елементами в збірці. Вони широко використовуються там, де потрібна висока потужність та надійність. Використовуються в електроінструментах, портативних пристроях, деяких електромобілях та системах зберігання енергії. Акумулятори в корпусі 18650 можуть мати ємність до 4000 mAh. Акумулятори LiFePo<sub>4</sub> 32700 3.2 В – 6000-10000 mAh.

Призматичні елементи (рис. 4.14, в) мають пласку прямокутну форму і зазвичай поміщені в жорсткий металевий корпус. Вони дозволяють ефективно використовувати простір завдяки своїй формі. Переваги: оптимальне використання простору та можливість створення великих модулів високої ємності. Металевий корпус забезпечує хороший захист та допомагає відводити тепло. Використовуються в електромобілях, стаціонарних системах зберігання енергії (наприклад, для сонячних панелей), великих акумуляторних збірках, наприклад як на рис (рис. 4.14, з). Представлений на рис. 4.14,в акумулятор (FP EVE LF50F 50Ah Grade B із контактами під гвинт M6) має ємність 50 Ah, номінальну напругу 3.2 В і внутрішній опір  $< 2$  мОм. Розмір акумулятора становить  $148,3 \times 127,0 \times 26,7$  мм, вага – 1050 г. Однак акумулятори цього типу можуть мати ємність до 320 Ah. Це колосальний заряд енергії, особливо якщо використовується збірка із 4 елементів у одному корпусі, як представлено на рис. 4.14, з.

Пакетні елементи (Pouch cells) – ці елементи мають гнучку алюмінієво-пластикову оболонку, що нагадує пакет (pouch). Вони не мають жорсткого металевого корпусу. В якості переваг слід вказати легкість та гнучкість, їх форму можна адаптувати під конкретні вимоги дизайну, що забезпечує високу питому енергоємність (Wh/kg). Велика площа поверхні сприяє ефективному охолодженню. Із зрозумілих причин підходять для нашого випадку реалізації МПК.

Блок накачування та контролю заряду містить керований імпульсний мережний блок живлення. У відомих конструкція [7, 15] застосовувалися класичні трансформаторні блоки живлення. Вони містили громіздкий та важкий підвищувальний трансформатор 220-3000 В. Він займав 30% об'єму та маси корпусу МПК. Тому застосування імпульсного підвищувального перетворювача достатньо знижує масо-габаритні показники. Задачею блоку накачування є формування необхідної напруги живлення батареї силових конденсаторів, які, в свою чергу можуть мати робочу напругу 1500-5000 В.

Батарея силових конденсаторів – найбільш відповідальний елемент, адже від нього залежатимуть всі характеристики кінцевого виробу. Вона забезпечує

накопичення необхідного об'єму енергії та максимально швидкої віддачі її у конструкцію розрядника. Для стаціонарного варіанту установки типовим вибором для МПК є високовольтні конденсатори, представлені на рис. 4.15, а, б. Робоча напруга таких конденсаторів 0,38-12 кВ. Зрозуміло, що для роботи в МПК необхідно обирати конденсатори з діапазону 3-10 кВ. Це найбільш оптимальні параметри.

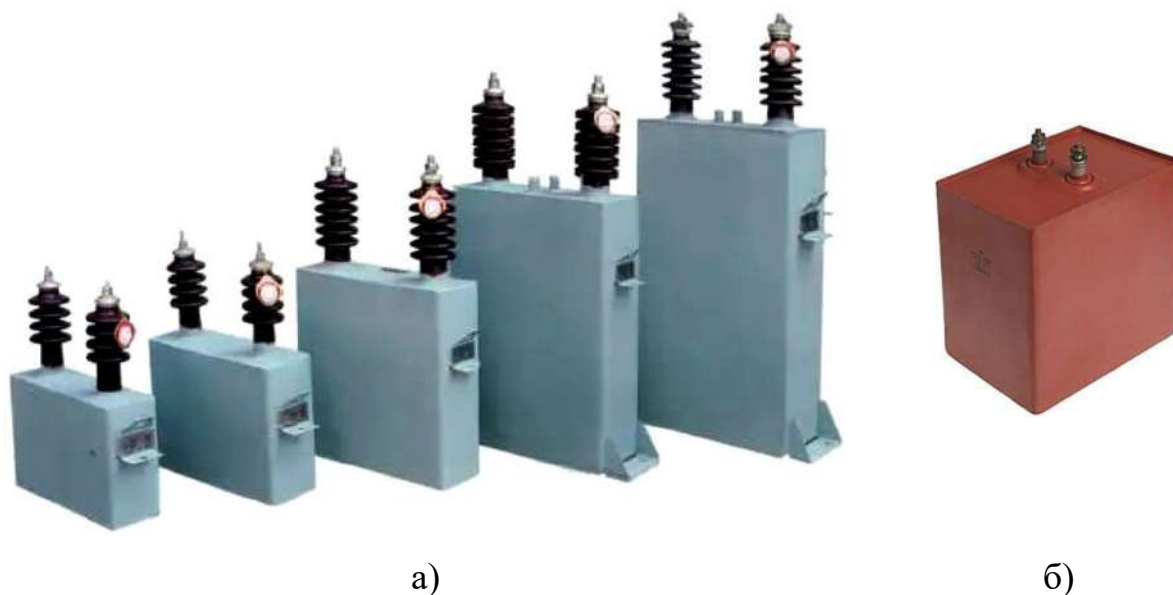


Рисунок 4.15 – Високовольтні конденсатори:

а) тип КПС, КЕП, КЕПМ, ВФМ, ВАМ; б) тип К75-40(а)

Силові конденсатори К75-40(а) – це високовольтні плівкові конденсатори з комбінованим діелектриком та металізованими обкладинками, призначені для роботи в імпульсних режимах. Їх основні характеристики:

- діапазон ємностей ( $C$ ): 2-100 мкФ;
- діапазон робочих напруг ( $U$ ): 1600...5000 В;
- допуск ємності:  $\pm 10\%$ ;
- амплітуда струму розрядження: 75...400 А;
- тангенс кута втрат ( $\text{tg}\delta$ ):  $\leq 0,008$  (при 50 Гц);
- постійна часу:  $\geq 500$  МОм·мкФ;
- частота проходження імпульсів:  $8 \cdot 10^{-5} \dots 10$  Гц;
- виконання: всекліматичне (В) та для помірного та холодного клімату (УХЛ), герметизованого типу.

Таблиця 4.2 – Залежність робочої напруги від ємності

U, В	C, мкФ									
	2	4	6	8	10	20	40	60	80	100
750		100	150	200	300		500	1000	1000	1000
1000	75	150	200	300	400	500	1000	1000	1000	2000
1600						500	1000	2000	2000	2000
2000	100	250	400	500	600	500	1000	2000	2000	2000
2500						500	1000	2000	2000	4000
3000						1000	1000	2000	3000	4000
4000						1000	2000	4000		
5000						1000	2000			

Трохи менші масо-габаритні показники мають конденсатори типу K75-40(a), але вони також не дозволяють будувати компактні переносні МПК. Так, наприклад дані конденсатори можуть мати габарити (довжина – 105 мм, товщина – 170 мм, висота – 170 мм) і вагу – 3955 гр.

Враховуючи, що для забезпечення потрібної потужності в конструкції одного МПК має бути 2-4 подібних конденсатори, їх загальна маса може складати більше 12 кг (і це вага тільки блоку силових конденсаторів). Зрозуміло, що і загальні габарити будуть достатньо великими.

З цих міркувань, найбільш оптимальним варіантом сучасних силових конденсаторів можна рекомендувати тип LNK-Pxx (табл. 4.3-4.5, рис. 4.16-18).

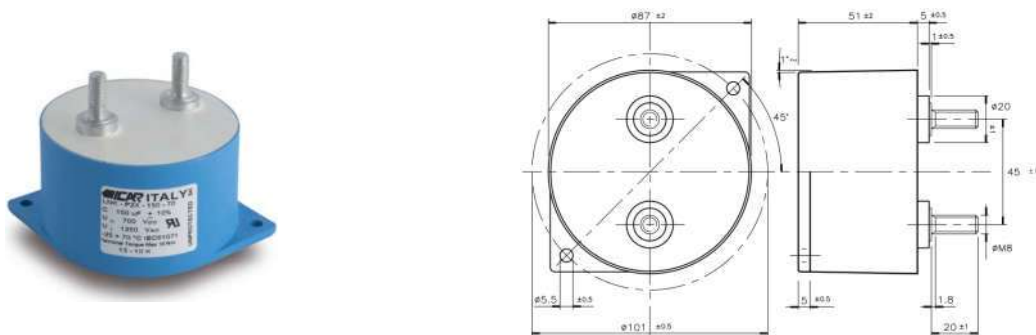


Рисунок 4.16 – Високовольтні силові конденсатори серії LNK-P4X

Таблиця 4.3 – Високовольтні силові конденсатори серії LNK-P2X

MODEL	Capacitance C <sub>μ</sub> (F)	Rated DC Voltage U <sub>2</sub> (V)	Peak Voltage U <sub>2</sub> (V)	Max rms Current I <sub>rms</sub> (A)	Peak Current I <sub>PK</sub> (A)	Self Inductance L <sub>s</sub> (nH)	Series Resistance R <sub>s</sub> (mΩ)	Thermal resistance with natural cooling R <sub>th</sub> (°C/W)	Full current Max Working Frequency (KHz)	Creepage between terminals (mm)	Clearance (mm)	Tightening Torque (Nm)	Fixing feet Tightening Torque (Nm)	Weight (Kg)	Box qty (pcs)
LNK-P2X-150-70	150	700	1400	85	5300	<30	0,4	10	10	28	28	10	2	0,45	16
LNK-P2X-100-90	100	900	1800	75	4500	<30	0,55	10	10	28	28	10	2	0,45	16
LNK-P2X-80-100	80	1000	2000	70	4000	<30	0,6	10	10	28	28	10	2	0,45	16
LNK-P2X-70-110	70	1100	2200	70	3800	<30	0,65	10	10	28	28	10	2	0,45	16
LNK-P2X-50-125	50	1250	2500	65	3200	<30	0,75	10	10	28	28	10	2	0,45	16
LNK-P2X-40-145	40	1450	2900	60	2900	<30	0,8	10	10	28	28	10	2	0,45	16
LNK-P2X-25-180	25	1800	3600	55	2300	<30	1	10	10	28	28	10	2	0,45	16

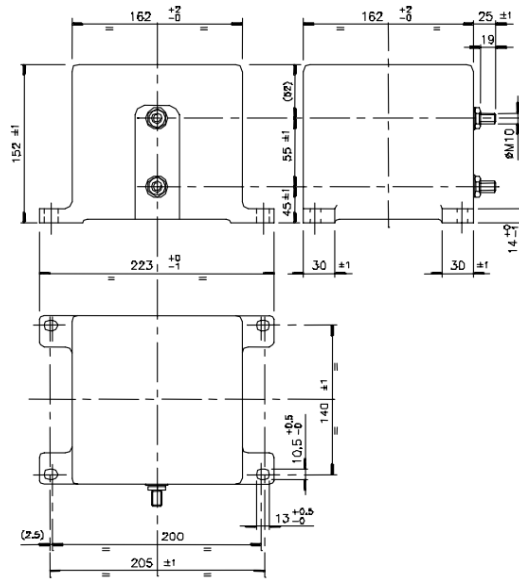


Рисунок 4.17 – Високовольтні силові конденсатори серії LNK-P4X

Таблиця 4.4 – Високовольтні силові конденсатори серії LNK-P4X

Model	Capacitance C (µF)	Rated DC Voltage Un (V)	Rated AC Voltage Urms (V)	Peak Voltage Us (V)	Max rms Current Imax (A)	dv / dt (V / µs)	Self Inductance L (nH)	Series Resistance Rs (mΩ)	Thermal Resistance with natural cooling Rthn (°C/W)	Full current Max Working Frequency** (kHz)	Tightening Torque (Nm)	Weight (kg)	Box qty (pcs)
LNK-P4X-2000-70	2000	700	200	1400	120	3	<30	0.5	2	20	20	5	4
LNK-P4X-1300-90	1300	900	250	1800	120	6	<30	0.6	2	20	20	5	4
LNK-P4X-900-110	900	1100	350	2200	120	10	<30	0.7	2	20	20	5	4
LNK-P4X-650-125	650	1250	400	2500	120	25	<30	0.8	2	20	20	5	4
LNK-P4X-500-145	500	1450	400	2900	100	30	<30	0.9	2	20	20	5	4
LNK-P4X-350-180	350	1800	450	3600	100	35	<30	1.1	2	20	20	5	4
LNK-P4X-220-220	220	2200	700	4400	120	85	<30	0.7	2	20	20	5	4
LNK-P4X-55-400	55	4000	1000	8000	60	150	<30	2.85	2	20	20	5	4
LNK-P4X-20-500	20	5000	1250	10000	50	280	<30	4.5	2	20	20	5	4

\*\* In case of doubt regarding maximum working frequency, please contact Icar Tech. Dept. for de-rating according to current spectrum

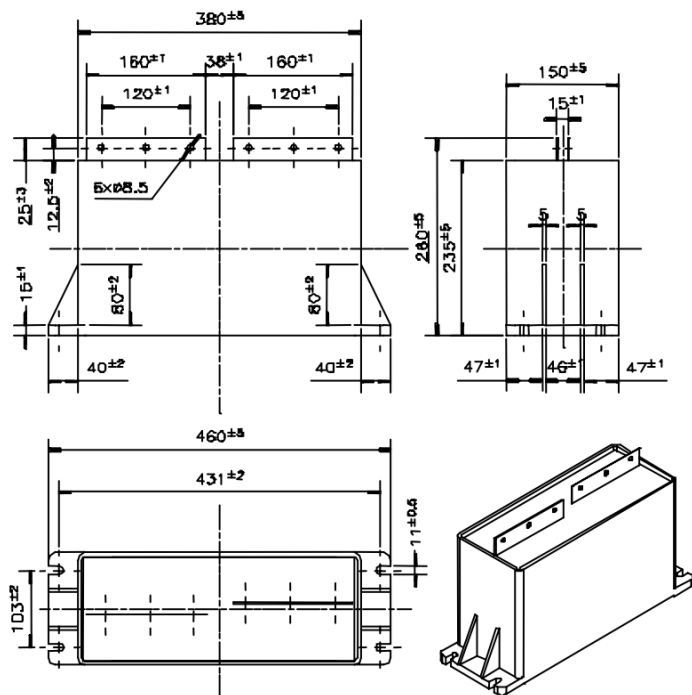


Рисунок 4.18 – Високовольтні силові конденсатори серії LNK-P5X

Таблиця 4.5 – Високовольтні силові конденсатори серії LNK-P5X

Model	Capacitance C (µF)	Rated DC Voltage Un (V)	Rated AC Voltage Urms	Peak Voltage Us (V)	Max rms Current Imax (A)	dv / dt (V / µs)	Self Inductance L (nH)	Series Resistance Rs (m Ω)	Thermal Resistance with natural cooling Rthn (°C/W)	Full current Max Working Frequency** (kHz)	Weight (kg)	Box qty (pcs)
LNK-P5X-8000-70	8000	700	200	1400	300	4	<30	0.14	1.15	20	18	1
LNK-P5X-5000-90	5000	900	250	1800	300	4	<30	0.18	1.15	20	18	1
LNK-P5X-4200-100	4200	1000	300	2000	250	4	<30	0.19	1.15	20	18	1
LNK-P5X-3500-110	3500	1100	350	2200	250	5	<30	0.21	1.15	20	18	1
LNK-P5X-2600-125	2600	1250	420	2500	250	7	<30	0.24	1.15	20	18	1
LNK-P5X-2000-145	2000	1450	420	2900	200	8	<30	0.28	1.15	20	18	1
LNK-P5X-1600-160	1600	1600	420	3200	200	10	<30	0.31	1.15	20	18	1
LNK-P5X-1300-180	1300	1800	450	3600	200	10	<30	0.34	1.15	20	18	1
LNK-P5X-1000-200	1000	2000	600	4000	250	25	<30	0.19	1.15	20	18	1
LNK-P5X-850-220	850	2200	700	4400	250	30	<30	0.21	1.15	20	18	1
LNK-P5X-650-250	650	2500	800	5000	250	30	<30	0.23	1.15	20	18	1
LNK-P5X-500-290	500	2900	850	5800	200	38	<30	0.27	1.15	20	18	1
LNK-P5X-400-320	400	3200	900	6400	200	40	<30	0.3	1.15	20	18	1
LNK-P5X-300-360	300	3600	950	7200	200	45	<30	0.36	1.15	20	18	1

\*\* In case of doubt regarding maximum working frequency, please contact Icar Tech. Dept. for de-rating according to current spectrum

Досить перспективними є конденсатори серії LNK-P3X, LNK-P6X, LNK-P7X та LNK-P8X. Деякі моделі забезпечують імпульсні струми розряду порядку 40000 А, в порівнянні із класичними конденсаторами, які мають струм 400 А, при цьому можуть мати напругу до 10000 В і ємність до 3000 мкФ. Такий вибір дозволяє зменшити масо-габаритні показники МПК і забезпечити мобільність МПК для польових застосувань. Як бачимо, за подібних параметрів МПК, побудований на сучасній елементній базі, має у 5-10 разів більшу потужність та у 3 рази менший блок силових конденсаторів.

Заряд батареї обмежується блоком керування і контролю. Залишковий розряд та приведення у черговий режим для безпеки обслуговуючого персоналу та навколишнього середовища забезпечується режимом саморозряду. Накопичена енергія шунтується через потужний дротяний керамічний резистор за допомогою реле саморозряду. В робочому режимі накопичена блоком силових конденсаторів енергія подається на силовий розрядник МПК.

Генератор форплазми живиться від мережі зовнішньої напруги ~220 В і представляє собою керований підвищувальний перетворювач з напруги 220 В до напруги 5000-10000 В. Цієї напруги достатньо для забезпечення пробійної відстані 5-10 мм повітря. Підлаштування можна здійснювати за допомогою блоку керування та контролю. Він містить високовольтний трансформатор, підвищувальна обмотка якого навантажена на розрядник форплазми МПК. Конструкція даного вузла представляє собою три ідентичних паралельно ввімкнені розрядники, які конструктивно встановлені поряд із силовим розрядником. Елементи розрядника підібрані відповідно до пробійної відстані.

Таким чином, імпульсний генератор виробляє короткі імпульси, які потім індукуються у вторинній обмотці трансформатора до напруги 5-10 кВ і пробивають розрядники форплазми.

Магнітоплазмовий компресор по суті містить конструктивно поєднані розрядник форплазми та розрядник силовий. До нього пред'являються підвищені умови: матеріал повинен мати високу стійкість до розряду та корозії, а елементи діелектрика високу температурну міцність.

Блок керування та контролю частково вже описаний вище. Окрім сказаного, він містить елементи керування та індикації, які дозволяють обирати необхідні режими та функції, регулюючи потужність і тривалість всіх процесів.

Модуль дистанційного керування є обов'язковим елементом, адже знаходження персоналу в зоні дії МПК заборонено. Вмикати пристрій дозволяється тільки дистанційно. В залежності від потреб, дистанційне керування може бути організовано на основі радіо пульта керування або мережних пристроїв та IoT.

Запропонована установка відкриває широкі перспективи здійснення високоефективної стерилізації на основі ультрафіолетового випромінювання, що характеризується потужною бактерицидною дією.

Перевагами запропонованого магнітоплазмового компресора є:

- виконання на сучасній елементній базі (дозволило мінімізувати установку, збільшити вихідну потужність та розширити функціонал);
- мобільність (пристрій може бути виготовлений у перевізному або переносному варіанті);
- висока потужність (імпульсна потужність залежить від блоку силових конденсаторів і може складати 10-50 МВт);
- висока ефективність (знищення хвороботворної мікрофлори до рівня медичної стерилізації);
- ККД імпульсного випромінювача складає порядку 75% і 7,4% відповідно для УФ діапазону;
- великий радіус дії, який дозволяє знезаражувати площі у кілька сотень квадратних метрів;

- можливість дистанційного керування (надзвичайно важлива функція, яка забезпечує керування пристроєм на великій відстані – в залежності від потреб, від сотень метрів, до кількох кілометрів; крім того можливе інтегрування мережевого модуля, який забезпечить віддалене керування з будь-якого місця, незалежно від розташування оператора);

- універсальність схеми живлення (мережа 220 В, акумулятор або сонячні батареї, що дозволяє заряджати і використовувати установку як в стаціонарних, так і в польових умовах фактично від будь-якого джерела енергії, наприклад автомобільного акумулятора, бортової системи авто чи сонячних модулів).

#### 4.2.2. Класифікація областей застосування імпульсного оптичного джерела УФ випромінювання на основі магнітоплазмового компресора

Області застосування МПК УФ діапазону в якості пристрою інактивації патогенних мікроорганізмів можуть бути найрізноманітніші: медицина, транспорт, побут, наука, промисловість, сільське господарство, тощо (рис. 4.19).



Рисунок 4.19 – Области застосування магнітоплазмового компресора

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У 4 розділі магістерської кваліфікаційної роботи здійснено порівняльний аналіз найбільш типових і поширених конструкцій джерел УФ випромінювання, який показав, що відомі пристрої призводить до необхідності довготривалої обробки приміщення для отримання потрібного рівня стерильності, мають застарілий та громіздкий форм-фактори, іноді мають високий рівень шкідливості, низьку ефективність, малий радіус дії, тощо.

Встановлено, що найбільш перспективним для антибактеріальної та стерилізаційної обробки об'єктів різної фізичної природи є використання імпульсних оптичних джерел випромінювання ультрафіолетового діапазону на основі магнітоплазмового компресора.

Запропоновано функціональну схему пристрою стерилізації на основі магнітоплазмового компресора, який містить сучасну елементну базу і вперше серед усіх відомих пристроїв може бути реалізований у переносному автономному варіанті. Особливістю пристрою є наявність універсального блоку живлення, який може забезпечувати роботу як в стаціонарних так і в польових умовах. Причому джерелом енергії може бути зовнішня мережа, акумулятор або сонячна панель.

Пристрій забезпечує покращені характеристики в порівнянні з аналогами: у 5-10 разів більшу потужність та у 3 рази менші масо-габаритні показники.

Керування пристроєм здійснюється дистанційно і, в залежності від потреб, може бути організоване за допомогою радіоканалу або сучасних мережних додатків, включаючи IoT. Це дозволяє оперативно керувати роботою пристрою та забезпечує високий рівень безпеки обслуговуючого персоналу.

За рахунок ККД імпульсного випромінювача що сягає 70% (7,4 % для УФ), вдалося суттєво скоротити (до 10 разів) час ультрафіолетового опромінення та значно зменшити енергетичні затрати.

## ВИСНОВКИ

1. Робота полягає у підвищенні ефективності методу стерилізації об'єктів і середовищ на основі впливу імпульсного електромагнітного випромінювання ультрафіолетового діапазону.

2. Детально розглянута бактерицидна дія ультрафіолетового випромінювання та сформульовано ряд вимог, які характеризують процес знешкодження інфекційної мікрофлори. Виявлено, що бактерицидною дією володіє ультрафіолетове випромінювання з діапазоном довжин хвиль від 205 до 315 нм, із піком в області 254 нм, що викликає деструктивно-фотохімічне модифіковане ушкодження ДНК клітинного ядра мікроорганізму.

3. Розроблена математична модель генерування широкосмугових імпульсних випромінювань оптичного діапазону на основі техніки магнітоплазмових прискорювачів заряджених частинок. В рамках моделі детально розглянуті процеси, які протікають в розрядному проміжку. Розглянуто перебіг процесу пробою у часі, виникнення та наростання стуму розряду та умов запалення самостійного розряду. Виявлено, що перебіг розрядних процесів підпорядковується моделі Таунсенда. Проведена оцінка та вирішена задача скорочення імпульсу при пробою, що дає можливість генерувати короткоімпульсні несинусоїдальні широкосмугові випромінювання нано- і субнаносекундної тривалості при безпосередньому збудженні випромінюючої структури електронним пучком. За результатами моделювання побудовані часові залежності значень миттєвого струму розряду накопичувача, миттєвої напруги, миттєвої потужності, величини втрат запасеної енергії при розряді конденсатора та розраховані максимальні значення миттєвого струму розряду накопичувача, миттєвої потужності, отримані ефективні значення втрат запасеної енергії на конденсаторі, величин струму, напруги та потужності при різних значеннях опору, індуктивності та зарядної напруги розрядного контуру генератора імпульсного стерилізатора на основі магнітоплазмового компресора з плазмовою гарматою. Надано рекомендацій щодо оптимізації структури джерела електромагнітного випромінювання.

4. Одержані значення запасеної реальним ємнісним накопичувачем кількості енергії та пікового струму. Графічне представлення розрядного процесу на основі високострумowego конденсатора демонструє різке наростає струму в момент замикання розрядного проміжку. Максимум досягається на відріжку часу порядку одиниць мікросекунд. Швидке спадання струму фактично відбувається без виражених коливань, що відповідає режиму, близькому до критичного затухання. Амплітуда піку становить сотні кілоампер, що узгоджується з теоретичними оцінками.

5. На основі отриманого графіку залежності густини потоку енергії від накопиченої енергії, проведена оцінка температури плазми в області плазмового фокусу та повної енергії випромінювання магнітоплазмового компресора. Розрахована температура плазми в області плазмового фокуса становить  $1,7 \cdot 10^4$  °К, а повна енергія випромінювання складає 2,65 кДж.

6. Запропоновано функціональну схему пристрою стерилізації на основі магнітоплазмового компресора, який містить сучасну елементну базу і вперше серед усіх відомих пристроїв може бути реалізований у переносному автономному варіанті. Особливістю пристрою є наявність універсального блоку живлення, який може забезпечувати роботу як в стаціонарних так і в польових умовах. Причому джерелом енергії може бути зовнішня мережа, акумулятор або сонячна панель. Пристрій забезпечує покращені характеристики в порівнянні з аналогами: у 5-10 разів більшу потужність та у 3 рази менші масо-габаритні показники. За рахунок ККД імпульсного випромінювача що сягає 70% (7,4 % для УФ), вдалося суттєво скоротити (до 10 разів) час ультрафіолетового опромінення та значно зменшити енергетичні затрати.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 62471:2009. Фотобіологічна безпечність ламп і лампових систем (IEC 62471:2006, IDT). – Від 2012-01-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2009. – 14 с.
2. ДСТУ IEC 7271:2012. Джерела світла штучні. Метод визначення густини потоку енергії ультрафіолетового випромінювання (IEC 7271:2012, IDT). – Від 2013-03-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2013. – 12 с.
3. ДБН В.2.5-28-2018: Природне і штучне освітлення. – ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК). – Дата прийняття: 01.03.2019.
4. Санітарно-протиепідемічні правила і норми використання ультрафіолетового бактерицидного випромінювання для знезараження повітря та дезінфекції поверхонь в приміщеннях закладів охорони здоров'я та установ/закладів надання соціальних послуг / соціального захисту населення. / Наказ Міністерства охорони здоров'я України 06 травня 2021 року № 882 // :К. – 2021.
5. Суворова К. І. Джерела світла. Навчальний посібник/ К. І. Суворова, Л. Д. Гуракова // – Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2021. – 110 с.
6. Патент 86388 Україна, МПК (2009) H05H 1/00 , F03H 1/00 Україна. Плазмовий прискорювач / Ю. О. Сисоєв (UA), А. В. Лоян (UA), М. М. Кошелев (UA) ; заявник і патентовласник Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”. – № ua200605620 ; заявл. 23.05.2006 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8. – 5 с.
7. Патент 49383 Україна, МПК H01T 13/00 Керований сильнострумний комутатор / В. І. Чумаков, О. В. Столярчук, Г. Ф. Коняхін, М. О. Острижний ; заявник і власник Харківський національний університет радіоелектроніки, ХНУРЕ. – № u200911901 ; заявл. 20.11.2009 ; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8. – 6 с.
8. Pulse high-power antibacterial irradiator / S. N. Shostko, V. I. Chumakov, Yu. F. Lonin [e.a.] // Biological Treatment Using Electromagnetic Fields and Ionized

Gases, ElectroMed99 : First Internatoinal Symposium in Nonthermal Medical /, Norfolk, Virginia, USA, 11-14 April, 1999 : Symposium Record Abstracts. – Norfolk, 1999. – P. 96.

9. Simulation of the thermal mechanism in semiconductors under action of pulsed electromagnetic fields / V. I. Chumakov, V. I. Slichenko, A.V. Stolarhuk, A. M. Egorov, Yu. F. Lonin // Problems of atomic science and technology. Series : Nuclear Physics Investigations. KNURE, Kharkov, Ukraine, 2004. – № 2. (43). –P. 203-205.

10. Nanoparticle generation on plasma technology / V. I. Chumakov, A. A. Taranchuk, A.V. Stolarhuk, M. A. Ostrizhnoy // Science and Nanotechnology, IWAMSN 2010 : The 5th International Workshop on Advanced Material, Hanoi, Vietnam, Nov. 9-12, 2010, NLE. – Hanoi, 2010. – P 13.

11. Чумаков В. І. Перспективи використання імпульсних оптичних джерел випромінювання ультрафіолетового діапазону для стерилізаційної обробки об'єктів / В. І. Чумаков, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції, Одеса, 3 червня 2013 р. – Одеса, 2013. – С. 130-131.

12. Kirichenko Yu.V. Microwave radiation of the column of isotropic and magnetized plasma / Yu.V. Kirichenko, Yu. F. Lonin, I. N. Onishchenko // Antenna Theory and Techniques (ICATT), 2013 : IX International Conference, Odessa, 2013. – P. 120-122.

13. Kirichenko Y. V. Plasma antenna of traveling wave with axial radiation / Yu. V. Kirichenko, Yu. F Lonin, I. N. Onishchenko // Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), 2013 : International Kharkov Symposium on 23-28 June, 2013. – Kharkov, 2013. P. 334-336.

14. Kirichenko Y. V. Microwave radiation of cylindrical plasma column / Yu. V. Kirichenko, Yu. F. Lonin, I. N. Onishchenko // Radioelectronics and Communications Systems. – 2014. – Vol. 57, No. 10. – P. 474-479.

15. Taranchuk A. A. Impulse Sterilizer of High Effectiveness / A. A. Taranchuk, V. I. Chumakov, V. V. Michan, A. A. Pavlov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunication and Computer Science: Proceedings of the XII International Conference TCSET'2014, Lviv–Slavske, Ukraine on February 25, 2014. – Lviv, 2014 – P. 722-723.

16. Документація Simulink. *[Електронний ресурс]* : URL: <https://docs.exponenta.ru/simulink/index.html>. (дата звернення: 15.10.2025). – Назва з екрану.



*Хмельницький національний університет*  
**ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
*Кафедра телекомунікацій, медійних  
та інтелектуальних технологій*

**Козицький Дмитро Володимирович**

**ІМПУЛЬСНИЙ МАГНІТНО-ПЛАЗМОВИЙ КОМПРЕСОР ДЛЯ  
АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ ТА СТЕРИЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ  
МАТЕРІАЛІВ**

*Науковий керівник – к.т.н., доцент, Стецюк В. І.*

*Хмельницький, 2025 р.*

## МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

2

Підвищення ефективності методу стерилізації об'єктів і середовищ на основі впливу імпульсного електромагнітного випромінювання ультрафіолетового діапазону

## НАУКОВІ ЗАДАЧІ

- ✓ 1) провести аналітичний огляд існуючих рішень, здійснити класифікацію області застосування імпульсного оптичного джерела УФ випромінювання на основі магнітоплазмового компресора;
- ✓ 2) сформувавши математичний апарат генерування широкосмугових імпульсних випромінювань ультрафіолетового діапазону;
- ✓ 3) здійснити моделювання процесів імпульсного електромагнітного випромінювання у магнітоплазмовому компресорі;
- ✓ 4) здійснити апаратну реалізацію магнітоплазмового компресора на рівні функціональної схеми.

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:** процеси формування імпульсних розрядів плазмових потоків в атмосферному середовищі

**ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:** джерела потужного імпульсного електромагнітного опромінення ультрафіолетового діапазону

Таблиця 3.1 – Види ультрафіолетового випромінювання

Найменування	Абревіатура	Довжина хвилі, нм	Кількість енергії на фотон, еВ
Близьке	NUV	400-300	3,10-4,13
Середнє	MUV	300-200	4,13-6,20
Далеке	FUV	200-122	6,20-10,2
Екстремальне	EUV, XUV	121-10	10,2-124
Вакуумне	VUV	200-10	6,20-124
Ультрафіолет А (довгохвильовий діапазон)	UVA	400-315	3,10-3,94
Ультрафіолет В (середній діапазон)	UVB	315-280	3,94-4,43
Ультрафіолет С (короткохвильовий, герміцидний діапазон)	UVC	280-100	4,43-12,4



Рисунок 3.1 – Пряма дія ультрафіолетового випромінювання на живі тканини

Дослідження пробійної характеристики між електродного проміжку.

Емпірична залежність Таунсенда для опису іонізаційного коефіцієнту  $\alpha$ :

$$\alpha = APe^{(-BP/E)} \quad (3.1)$$

Закон Пашена (залежність порогового поля від тиску).

$$V_n = \frac{B(Pd)}{\ln(Pd) + C}, \quad \frac{E_n}{P} = \frac{B}{\ln(Pd) + C}, \quad C = \ln \frac{A}{\ln(1 + 1/\gamma)}, \quad (3.2)$$

Параметри точки мінімуму кривих Пашена:

$$(Pd)_{min} = \frac{\bar{e}}{A} \ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right), \quad \left( \frac{E}{P} \right)_{min} = B, \quad U_{min} = \frac{\bar{e}B}{A} \ln \left( 1 - \frac{1}{\gamma} \right), \quad (3.3)$$

Експериментальні дані для повітряного пробійного проміжку при  $A=15$ ,  $B=365$ ,  $\gamma=10^{-2}$ :

$$C=1,18; \quad (Pd)_{min}=0,83 \text{ торр}\cdot\text{см}; \quad (E/P)_{min}=365 \text{ В}/(\text{торр}\cdot\text{см}); \quad U_{min}=300 \text{ В}.$$

Для залізного електрода:

$$(Pd)_{min}=0,57 \text{ торр}\cdot\text{см}; \quad (E/P)_{min}=580 \text{ В}/(\text{торр}\cdot\text{см}); \quad U_{min}=330 \text{ В}.$$

$$(3.4) \quad I_e = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i^2(t) \cdot dt}$$

$$U_e = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} u^2(t) \cdot dt} \quad (3.5)$$

$$(3.6) \quad P_e = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} p^2(t) \cdot dt}$$

$$W_e = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} W^2(t) \cdot dt} \quad (3.7)$$

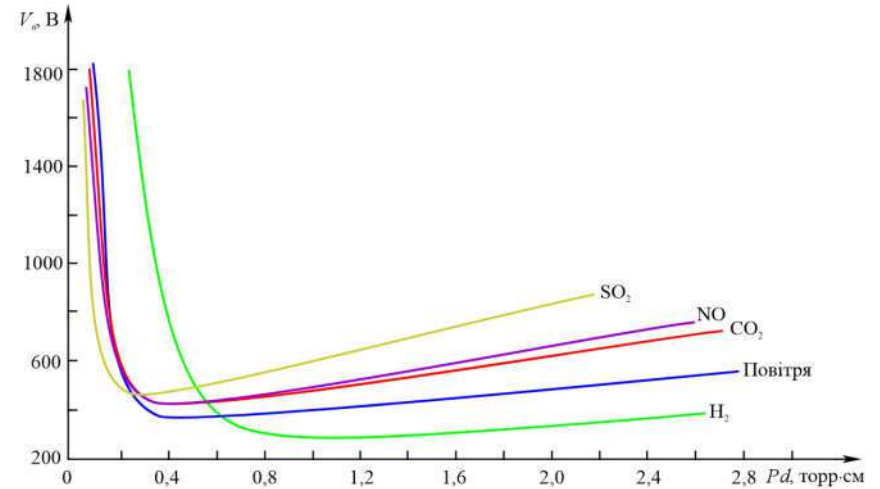


Рисунок 3.1 – Закон розподілу пробійного поля (криві Пашена)

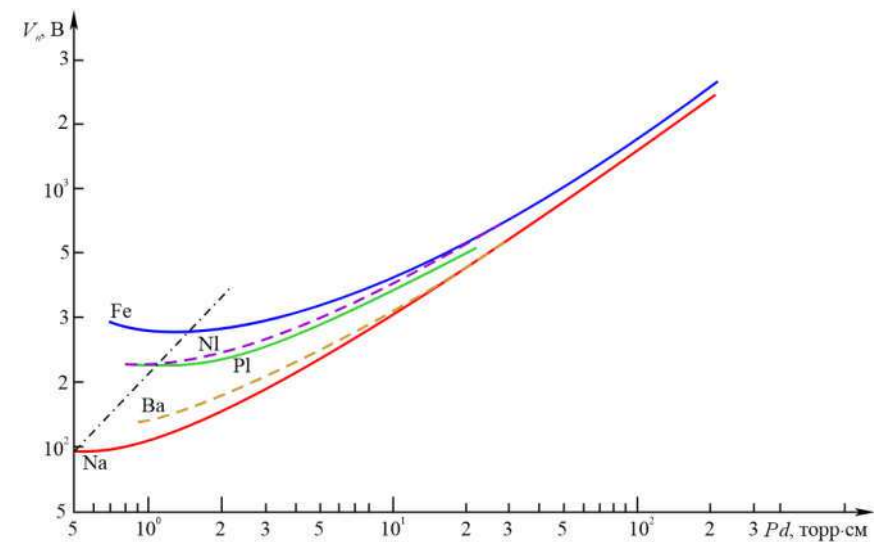


Рисунок 3.3 – Вплив матеріалу електрода на напругу пробою

Моделювання процесу формування надкоротких високострумових розрядів

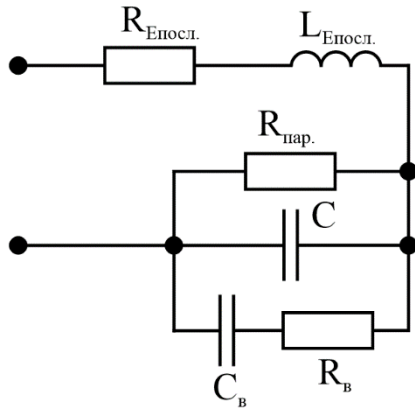
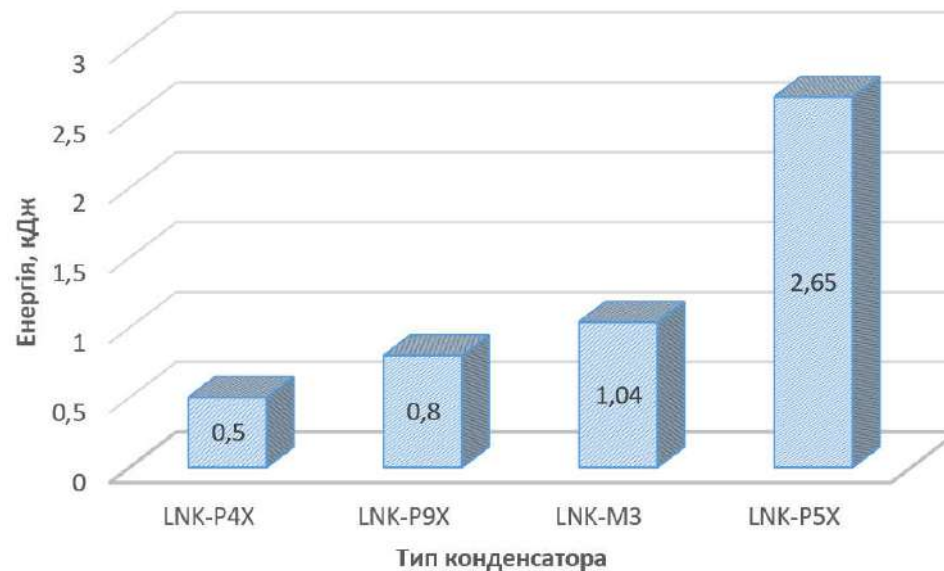


Рисунок 4.1 – Еквівалентна схема силового конденсатора

$$W_{C1} = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}5300 \cdot 10^{-6} \cdot (1000)^2 = 2650 \text{ Дж (2,65 кДж)} \quad (4.1)$$



Таблиця 4.1 – Вибір конденсаторів для блоку накопичення заряду МПК

Тип конденсатора	Напруга, В	Ємність, мкФ	Розрядний струм робочий / піковий, А	Накопичена енергія, кДж
LNK-P4X	1100	900	120 / 7000	0,5
LNK-P9X	2000	400	120 / 10000	0,8
LNK-M3-1230-1300	1300	1230	100/7700	1,04
LNK-P5X	1000	5300	250/29000	2,65

Вихідні дані для запропонованого МПК:

$$C1=5300 \mu\text{Ф}=5,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ф};$$

$$U_0=1000 \text{ В};$$

$$R=0,0029 \text{ Ом};$$

$$L=10 \text{ нГн}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx 1,37 \cdot 10^5 \text{ рад/с} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} = 1,45 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1} \quad (4.3)$$

$$I_{\text{нік.}} \approx \frac{U_0}{R} \approx 250 \text{ кА} \quad (4.4)$$

$$W_{C1} = \frac{1}{2} CU^2 = 2650 \text{ Дж} \quad (4.5)$$

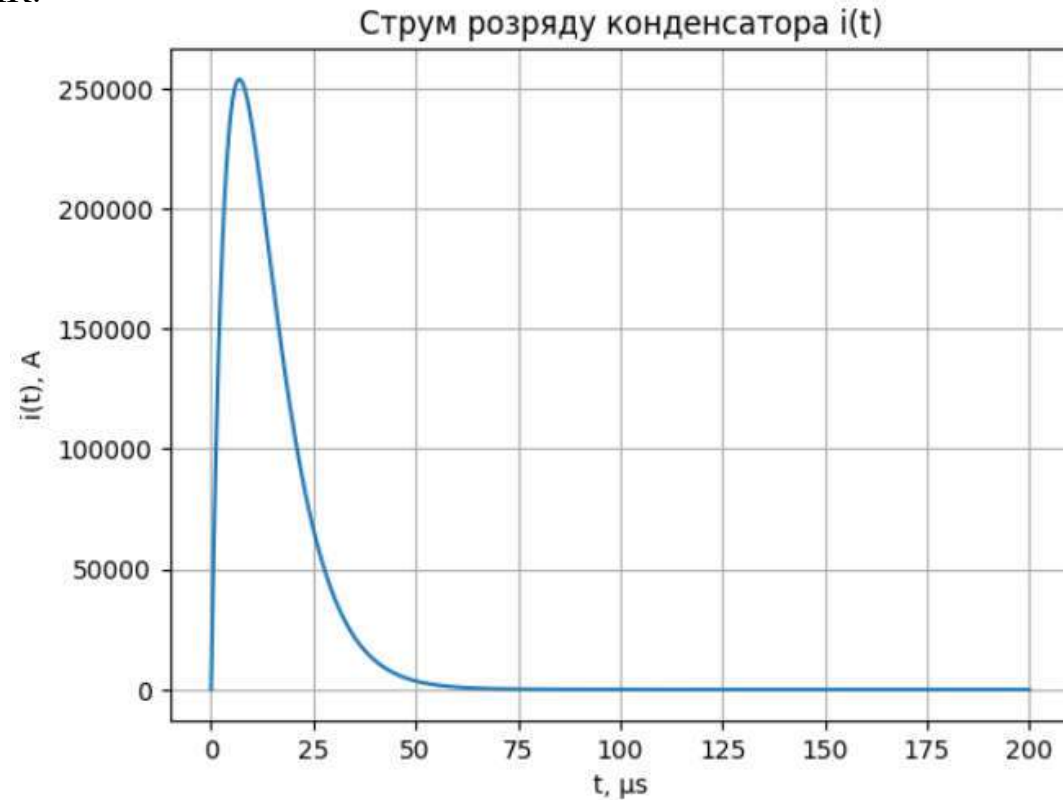


Рисунок 4.2 – Графічне представлення розрядного процесу на основі високострумowego конденсатора для запропонованої моделі МПК

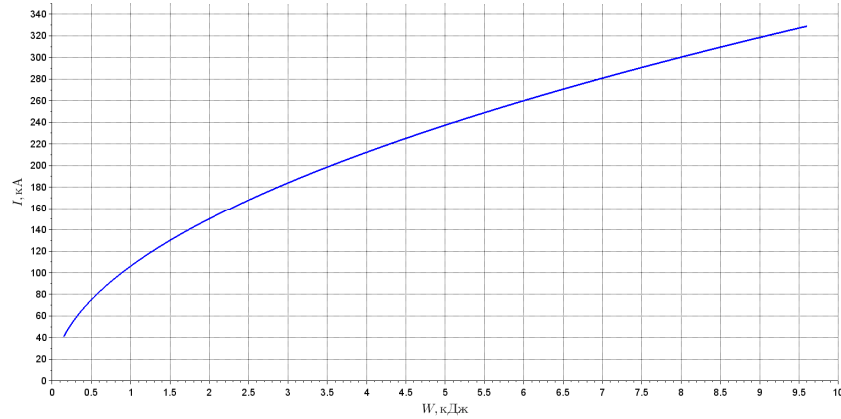


Рисунок 4.3 – Графік залежності струму розряду від величини накопиченої енергії

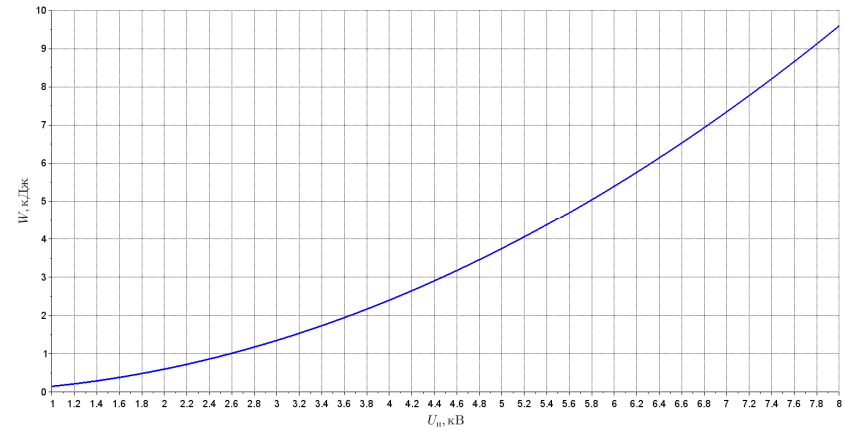


Рисунок 4.4 – Графік залежності величини накопиченої енергії від напруги заряду ємнісного накопичувача

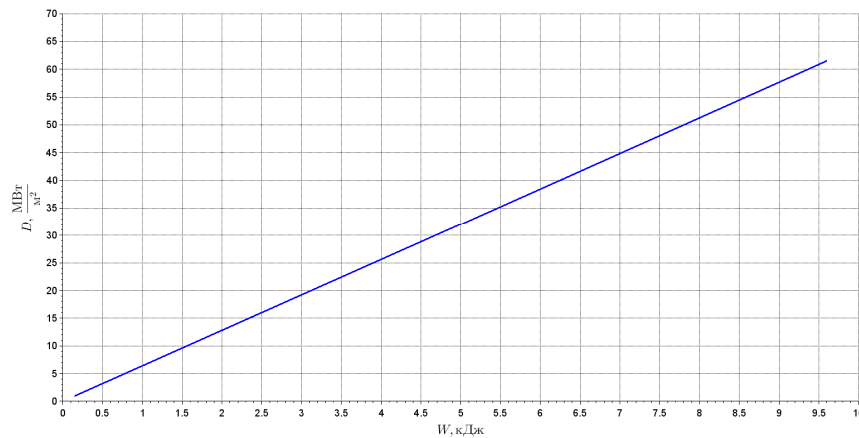


Рисунок 4.5 – Графік залежності густини потоку енергії від накопиченої енергії

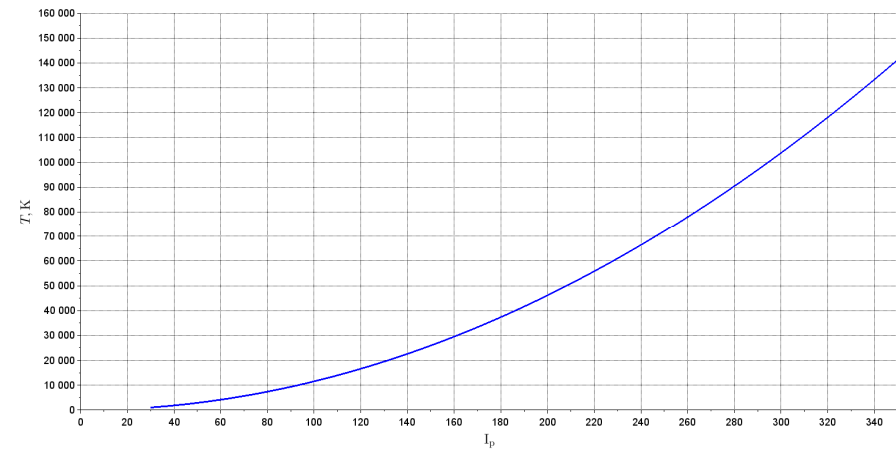
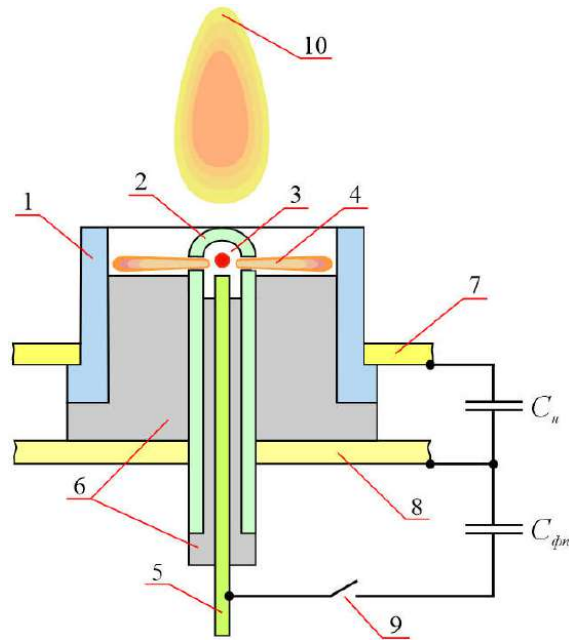


Рисунок 4.6 – Графік залежності температури  $T$  від розрядного струму  $I_p$



- 1 – зовнішній електрод; 2 – центральний електрод;  
 3 – камера формування форплазми; 4 – плазмові струмені;  
 5 – додатковий електрод; 6 – фторопластові ізолятори; 7 – листовий електрод накопичувача (анод);  
 8 – листовий електрод накопичувача (катод); 9 – розрядник; 10 – плазмовий фокус

Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд МПК з напуском форплазми

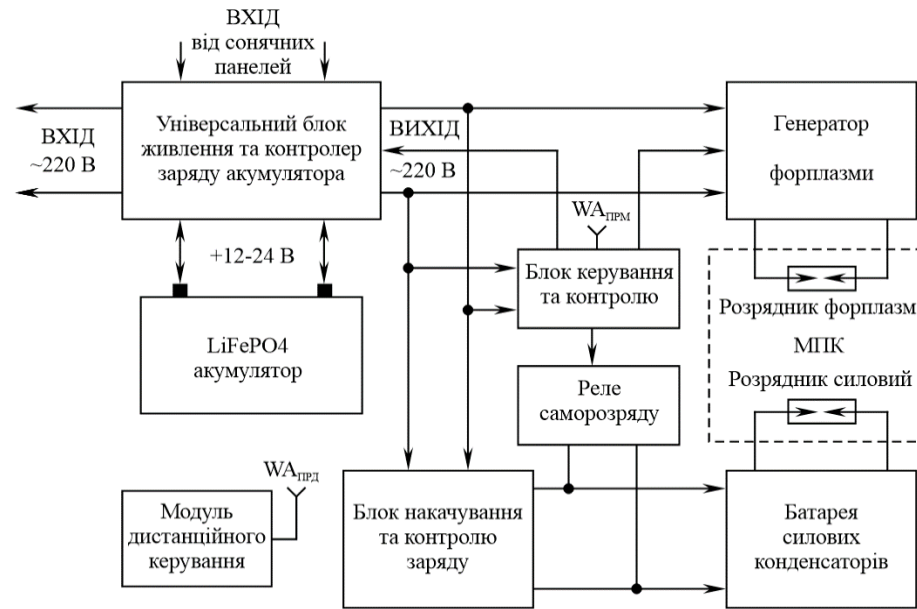


Рисунок 5.2 – Схема електрична функціональна МПК

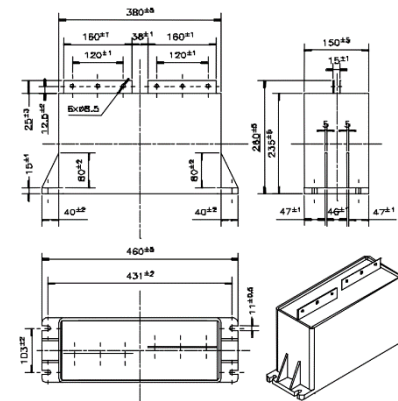


Рисунок 5.3 – Високовольтні силові конденсатори серії LNK-P5X

1. Робота полягає у підвищенні ефективності методу стерилізації об'єктів і середовищ на основі впливу імпульсного електромагнітного випромінювання ультрафіолетового діапазону.

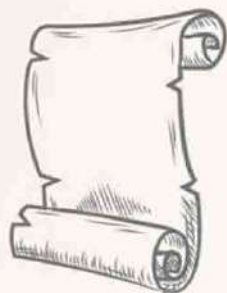
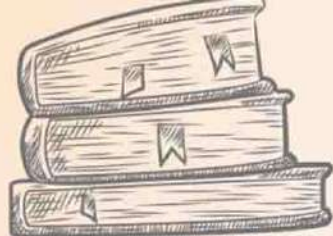
2. Детально розглянута бактерицидна дія ультрафіолетового випромінювання та сформульовано ряд вимог, які характеризують процес знешкодження інфекційної мікрофлори. Виявлено, що бактерицидною дією володіє ультрафіолетове випромінювання з діапазоном довжин хвиль від 205 до 315 нм, із піком в області 254 нм, що викликає деструктивно-фотохімічне модифіковане ушкодження ДНК клітинного ядра мікроорганізму.

3. Розроблена математична модель генерування широкосмугових імпульсних випромінювань оптичного діапазону на основі техніки магнітоплазмових прискорювачів заряджених частинок. В рамках моделі детально розглянуті процеси, які протікають в розрядному проміжку. Розглянуто перебіг процесу пробою у часі, виникнення та наростання стуму розряду та умов запалення самостійного розряду. Виявлено, що перебіг розрядних процесів підпорядковується моделі Таунсенда. Проведена оцінка та вирішена задача скорочення імпульсу при пробою, що дає можливість генерувати короткоімпульсні несинусоїдальні широкосмугові випромінювання нано- і субнаносекундної тривалості при безпосередньому збудженні випромінюючої структури електронним пучком. За результатами моделювання побудовані часові залежності значень миттєвого струму розряду накопичувача, миттєвої напруги, миттєвої потужності, величини втрат запасеної енергії при розряді конденсатора та розраховані максимальні значення миттєвого струму розряду накопичувача, миттєвої потужності, отримані ефективні значення втрат запасеної енергії на конденсаторі, величин струму, напруги та потужності при різних значеннях опору, індуктивності та зарядної напруги розрядного контуру генератора імпульсного стерилізатора на основі магнітоплазмового компресора з плазмовою гарматою. Надано рекомендацій щодо оптимізації структури джерела електромагнітного випромінювання.

4. Одержані значення запасеної реальним ємнісним накопичувачем кількості енергії та пікового струму. Графічне представлення розрядного процесу на основі високострумowego конденсатора демонструє різке наростає струму в момент замикання розрядного проміжку. Максимум досягається на відрізок часу порядку одиниць мікросекунд. Швидке спадання струму фактично відбувається без виражених коливань, що відповідає режиму, близькому до критичного затухання. Амплітуда піку становить сотні кілоампер, що узгоджується з теоретичними оцінками.

5. На основі отриманого графіку залежності густини потоку енергії від накопиченої енергії, проведена оцінка температури плазми в області плазмового фокусу та повної енергії випромінювання магнітоплазмового компресора. Розрахована температура плазми в області плазмового фокуса становить  $1,7 \cdot 10^4$  °K, а повна енергія випромінювання складає 2,65 кДж.

6. Запропоновано функціональну схему пристрою стерилізації на основі магнітоплазмового компресора, який містить сучасну елементну базу і вперше серед усіх відомих пристроїв може бути реалізований у переносному автономному варіанті. Особливістю пристрою є наявність універсального блоку живлення, який може забезпечувати роботу як в стаціонарних так і в польових умовах. Причому джерелом енергії може бути зовнішня мережа, акумулятор або сонячна панель. Пристрій забезпечує покращені характеристики в порівнянні з аналогами: у 5-10 разів більшу потужність та у 3 рази менші масо-габаритні показники. За рахунок ККД імпульсного випромінювача що сягає 70% (7,4 % для УФ), вдалося суттєво скоротити (до 10 разів) час ультрафіолетового опромінення та значно зменшити енергетичні затрати.



**International Science Group**

**ISG-KONF.COM**

**XIII**

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC  
AND PRACTICAL CONFERENCE  
«INNOVATIVE DIRECTIONS FOR IMPROVING SCIENCE,  
RESEARCH AND PRACTICE»**

**Krakow, Poland**

**November 25-28, 2025**

**ISBN 979-8-90070-300-8**

**DOI 10.46299/ISG.2025.2.13**

# **INNOVATIVE DIRECTIONS FOR IMPROVING SCIENCE, RESEARCH AND PRACTICE**

Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference

Krakow, Poland  
November 25-28, 2025

**UDC 01.1**

The 13th International scientific and practical conference “Innovative directions for improving science, research and practice” (November 25-28, 2025) Krakow, Poland. International Science Group. 2025. 207 p.

**ISBN – 979-8-90070-300-8**

**DOI – 10.46299/ISG.2025.2.13**

EDITORIAL BOARD

<u>Pluzhnik Elena</u>	Professor of the Department of Criminal Law and Criminology Odessa State University of Internal Affairs Candidate of Law, Associate Professor
<u>Liudmyla Polyvana</u>	Department of accounting, Audit and Taxation, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine
<u>Mushenyk Iryna</u>	Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of Mathematical Disciplines, Informatics and Modeling. Podolsk State Agrarian Technical University
<u>Prudka Liudmyla</u>	Odessa State University of Internal Affairs, Associate Professor of Criminology and Psychology Department
<u>Marchenko Dmytro</u>	PhD, Associate Professor, Lecturer, Deputy Dean on Academic Affairs Faculty of Engineering and Energy
<u>Harchenko Roman</u>	Candidate of Technical Sciences, specialty 05.22.20 - operation and repair of vehicles.
<u>Belei Svitlana</u>	Ph.D., Associate Professor, Department of Economics and Security of Enterprise
<u>Lidiya Parashchuk</u>	PhD in specialty 05.17.11 "Technology of refractory non-metallic materials"
<u>Levon Mariia</u>	Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Scientific direction - morphology of the human digestive system
<u>Hubal Halyna Mykolaiivna</u>	Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

TABLE OF CONTENTS

AGRICULTURAL SCIENCES		
1.	Zhelal E., Akmuradov I., Kaimbayeva L. MUTTON IS A HIGH-QUALITY RAW MATERIAL FOR DELICATESSEN PRODUCTS	9
AGRONOMY		
2.	Резніченко В.П., Детиненко Я.С., Москальченко В.В., Глазунова К.О., Стадніченко А.Р. ВПЛИВ ІНОКУЛЯЦІЇ НА ФОРМУВАННЯ МОРФМЕТРИЧНОЇ СТРУКТУРИ ГАЛЕГИ СХІДНОЇ	13
ART		
3.	Моценко П.М., Світ М.О. ХУДОЖНЬО-КОМУНІКАТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ВЕКТОРНИХ ПРИНТІВ У ДИЗАЙНІ ФУТБОЛОК	16
4.	Олешко В.В., Чеботова Я.В. UX/UI-ДИЗАЙН ЗАСТОСУНКІВ ПОБУТОВИХ ПОСЛУГ: ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ЗРУЧНОГО ЦИФРОВОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ КОРИСТУВАЧА	19
CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING		
5.	Klimko Y., Koshchii I. SYNTHESIS OF CAGE AMINES BY THE RITTER REACTION	22
6.	Ковальова К.О., Мартинюк А.С., Іваненко О.І. ПІДХОДИ ДО КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИКИДІВ У ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ	28
COMPUTER SCIENCE		
7.	Andrushchak I., Bandach G. ASYNCHRONOUS PROCESSING IN SALESFORCE: FUTURE METHODS, QUEUEABLE APEX AND BATCH OPERATIONS FOR RESOURCE OPTIMIZATION	32
8.	Андрущак І., Колошко О. ПРИСКОРЕННЯ АЕАД-ОПЕРАЦІЙ ЗА РАХУНОК ПОПЕРЕДНІХ ОБЧИСЛЕНЬ У ПРИСТРОЯХ З МАЛОЮ ПАМ'ЯТТЮ	38

9.	Антонюк П.О. МІКРОФРОНТЕНД АРХІТЕКТУРА: ГНУЧКІСТЬ РОЗРОБКИ ТА НАЛАШТУВАННЯ ВЕБ-ДОДАТКІВ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ КОНТРАГЕНТІВ	43
10.	Карнатов С. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФРАКТАЛЬНОГО СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ СТАНДАРТАМИ JPEG ТА JPEG2000	50
11.	Ніколаєнко В.О. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВЕБЗАСТОСУНКІВ ПРИ ІНТЕГРАЦІЇ СЕРВІСІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ	55
12.	Олейник М.В. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ПРОЕКТІВ	57
13.	Полетаєв М. ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВИДІЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ	59
14.	Цісар А.А., Ящук А.А. ANDROID-ДОДАТОК ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ ЗДОРОВИХ ЗВИЧОК ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІГРОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ	66
CULTUROLOGY AND MUSEOLOGY		
15.	Коваль Т.В. ВИСТАВКОВА ДІЯЛЬНІСТЬ БІБЛІОТЕК, МУЗЕЇВ, АРХІВІВ У СУЧАСНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ ПРОСТОРІ	68
CYBER SECURITY AND INFORMATION PROTECTION		
16.	Andrushchak I. METHODS OF GENERATION OF KEYS FOR ENCRYPTION ALGORITHMS BASED ON LINEAR STRUCTURES	73
17.	Доля Е.К. ТЕХНІКИ АТАКИ ТРОЯНСЬКИХ КОНІВ ТА МЕТОДИ ЇХНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ	77

18.	Коваленко Н.О. OSINT ТА КІБЕРРОЗВІДКА	80
19.	Мельник М.Є. КІБЕРБЕЗПЕКА КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	83
ECONOMY		
20.	Xueqing L., Dzhailov J. THE SCIENTIFIC AND OPTIMIZED PATH FOR THE ECONOMIC IMPROVEMENT OF B2C LOGISTICS SERVICE QUALITY	85
EDUCATION		
21.	Trofimchuk V., Vashai Y., Demchuk V. SIMULATION METHODS FOR DEVELOPING ECONOMIC COMPETENCE IN HIGH SCHOOL STUDENTS IN TECHNOLOGY CLASSES	89
22.	Бородашкін С.С. ВИКОРИСТАННЯ КРАЄЗНАВЧОГО МАТЕРІАЛУ У ПРОЦЕСІ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСКУРСІЙ З ДОШКІЛЬНИКАМИ	97
23.	Катюха А.М. СТАН ЗДОРОВ'Я ШКОЛЯРІВ У СТАРШІЙ ШКОЛІ ЖОВТИХ ВОД	99
24.	Кудринських О., Нічуговська Л. РОЛЬ НЕЙРОКОРЕКЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ЛОГОПЕДИЧНІЙ РОБОТІ З ДІТЬМИ ІЗ ЗАГАЛЬНИМ НЕДОРОЗВИНЕННЯМ МОВЛЕННЯ	102
25.	Олефір Н.В. ІНДИВІДУАЛЬНА ПРОГРАМА РОЗВИТКУ ЯК ІНСТРУМЕНТ СПІВПРАЦІ ПЕДАГОГІВ, БАТЬКІВ ТА ФАХІВЦІВ ІНКЛЮЗИВНО-РЕСУРСНОГО ЦЕНТРУ	106
26.	Паляченко Н.О., Гарлінська А.М., Масло Д.М. УДОСКОНАЛЕННЯ ФІЗИЧНИХ ЯКОСТЕЙ УЧНІВ СЕРЕДНЬОГО ВІКУ ЗАСОБАМИ АТЛЕТИЧНОЇ ГІМНАСТИКИ	109
27.	Сидоренко Н.І., Новікова М.О. КАЗКА ЯК ФЕНОМЕН НАРОДНОЇ ПЕДАГОГІКИ: ГЕНЕЗА, ТЕРМІНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА ЇЇ ПОТЕНЦІАЛ У ФОРМУВАННІ ЗВ'ЯЗНОГО МОВЛЕННЯ ДІТЕЙ ДОШКІЛЬНОГО ВІКУ	113

28.	Тирса А.П. ПІДГОТОВКА ВЧИТЕЛЯ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕМОЦІЙНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ТА РОЗВИТКУ ЕМОЦІЙНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УЧНІВ ПОЧАТКОВОЇ ШКОЛИ	117
ELECTRICAL ENGINEERING		
29.	Стецюк В., Козицький Д. ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ МАГНІТНО-ПЛАЗМОВИХ КОМПРЕСОРІВ ДЛЯ АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ ТА СТЕРИЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ	123
JURISPRUDENCE		
30.	Рорук S. PROBLEMS AND PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF E- JUSTICE	131
31.	Іващенко С.М., Іващенко В.С., Пешкун Р.Р. БАЛАНС МІЖ БЕЗПЕКОЮ ТА ПРАВАМИ ЛЮДИНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ	133
32.	Королянчук І.В. ГЕНДЕРНІ СТЕРЕОТИПИ, УПЕРЕДЖЕННЯ ТА ГЕНДЕРНИЙ МЕЙНСТРИМІНГ	137
MANAGEMENT		
33.	Rechun O., Andrievich T., Sadova S. MECHANISM OF STATE POLICY ON CONSUMER RIGHTS PROTECTION	140
34.	Salimbayev Y. DEVELOPMENT OF CONSULTING SERVICES IN KAZAKHSTAN	142
MECHANICAL ENGINEERING		
35.	Zenkin M., Savchuk A. DIRECTIONS FOR IMPROVING DRIVE SYSTEMS AND MODES OF MULTI-COLOR WEB PRINTING MACHINES OF SECTIONAL DESIGN	148
MEDICINE		
36.	Gojny A.J., Shumna T. EARLY DIAGNOSIS OF MULTIPLE SCLEROSIS USING MAGNETIC RESONANCE IMAGING (MRI)	152

## **ЗАСТОСУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ МАГНІТНО- ПЛАЗМОВИХ КОМПРЕСОРІВ ДЛЯ АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ ТА СТЕРИЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ**

**Стецюк Віктор**

к.т.н., доцент

Хмельницький національний університет

**Козицький Дмитро**

магістр

Хмельницький національний університет

Відомі [1, 2] різноманітні за типом впливу (хімічні, фізичні) способи нейтралізації збудників інфекційних захворювань, які можуть перебувати в повітрі, воді на поверхнях предметів, тощо. Процес знешкодження інфекційної мікрофлори характеризується рядом вимог:

- висока ефективність процесу обробки (знезараження, стерилізація, тощо);
- тривалість часу обробки (знаходиться в досить широких межах, в залежності від методу боротьби);
- відсутність побічних негативних ефектів.

Відомі радіаційні методи стерилізації, що використовують різноманітні іонізуючі випромінювання (рентгенівське, гама-випромінювання) викликають глибокі об'ємні модифікації хімічної структури оброблювальних об'єктів і призводять до утворення побічних хімічних сполук, що володіють специфічними біологічними властивостями. Термічні методи обробки об'єктів, що передбачають нагрівання оброблювальних об'єктів різним шляхом, наприклад мікрохвильовим опромінюванням. Термічні методи в їх різних модифікаціях є вельми енергоємними, потребують обладнання високої вартості і не завжди забезпечують необхідний рівень деконтамінації оброблювальних об'єктів. Крім того не всі предмети, а особливо поверхні можливо інтенсивно нагрівати. Недоліком відомих способів і пристроїв, як і будь-яких інших різновидів хімічних методів та пристроїв для їх здійснення, полягає в потенціальній небезпеці, оскільки при цьому можуть ініціюватися різноманітні хімічні реакції, що призводять до зміни фізико-хімічних і біологічних властивостей оброблювальних об'єктів.

В цьому плані, достатньо перспективно виглядають методи ультрафіолетового (УФ) бактерицидного знешкодження інфекційної мікрофлори. Ультрафіолетові методи обробки повітряного середовища проводиться вже достатньо давно за допомогою обладнання із ультрафіолетовим діапазоном випромінювання, принцип дії якого оснований на пропусканні електричного розряду через розріджений газ (включаючи пари ртуті), який перебуває усередині герметичного корпусу, у результаті чого відбувається

випромінювання. Прикладом такого обладнання є бактерицидні лампи, які являють собою штучне джерело випромінювання зі спектром від 205 до 315 нм. Найбільше поширення, завдяки високоефективному перетворенню електричної енергії у випромінювання, одержали розрядні ртутні лампи низького тиску, у яких процес електричного розряду в аргонно-ртутній суміші переходить у випромінювання з довжиною хвилі 253,7 нм. Ці лампи мають великий термін служби – від 5000 до 8000 годин. Відомі ртутні лампи високого тиску, які при невеликих габаритних розмірах мають велику одиничну потужність – від 100 до 1000 Вт, що дозволяє в окремих випадках зменшити число опромінювачів у бактерицидній установці. З іншого боку, вони мало економічні, мають низьку бактерицидну ефективність при терміні служби, в 10 разів менший в порівнянні з лампами низького тиску, і тому не знайшли широкого застосування.

Для більш раціонального використання на практиці бактерицидних ламп їх доцільно вбудовувати в бактерицидні опромінювачі, які представляють собою електротехнічний пристрій, який складається із самої УФ лампи, пускорегулюючого апарату, відбивної арматури і ряду допоміжних елементів. За конструктивним виконанням опромінювачі підрозділяються на три групи: відкриті, комбіновані та закриті. У відкритих опромінювачах прямий бактерицидний потік охоплює широку зону в просторі аж до тілесного кута. Вони призначаються для процесу знезаражування приміщень тільки у відсутності людей або при їхньому короткочасному перебуванні. У закритих опромінювачах, їх іноді називають рециркуляторами, лампи розташовуються в невеликому замкненому корпусі опромінювача і бактерицидний потік не має виходу за межі корпусу, тому опромінювачі можуть застосовуватися, коли в приміщенні перебувають люди. Енергія бактерицидного потоку дезактивує більшість вірусів і бактерій, що попадають у внутрішній блок разом з повітряним потоком. У корпусі опромінювача передбачені дифузори, через які за допомогою вбудованого вентилятора повітря надходить усередину приладу, де попадає під джерело УФ випромінювання в замкненому просторі внутрішнього блоку, після чого вертається в приміщення. Комбіновані опромінювачі зазвичай забезпечуються двома бактерицидними лампами, розділеними між собою екраном так, щоб потік від однієї лампи направлявся тільки в нижню зону приміщення, від іншої – у верхню зону. Лампи можуть включатися разом і окремо. Бактерицидна установка містить у собі групу бактерицидних опромінювачів.

Тривалість роботи бактерицидної установки, при якій досягається необхідний рівень бактерицидної ефективності, різна залежно від типу опромінювача: для закритих опромінювачів від 1 до 2 годин і більше; для відкритих і комбінованих від 0,25 до 0,5 години і більше; для систем приточно-втяжної вентиляції 1 година й більше.

Робота бактерицидних ламп може супроводжуватися виділенням озону. Наявність озону в повітряному середовищі у високих концентраціях небезпечна для здоров'я людини, тому приміщення, де розміщуються установки, повинні провітрюватися системами загальнообмінної приточно-втяжної вентиляції.

Застосування ультрафіолетової енергії стає усе більш актуальним, оскільки є одним із головних методів інактивації вірусів, бактерій і грибків. Під інактивацією мікроорганізмів розуміють втрату їх здатності до розмноження після стерилізації або дезінфекції.

Бактерицидною дією володіє ультрафіолетове випромінювання з діапазоном довжин хвиль від 205 до 315 нм, воно викликає деструктивно-фотохімічне модифіковане ушкодження ДНК клітинного ядра мікроорганізму. Зміни в ДНК мікроорганізмів накопичуються та призводять до затримки темпів їх розмноження і подальшому вимиранню в першому та наступних поколіннях. У результаті ряду спостережень було відзначено, що вплив енергії в діапазоні спектру UVC найбільш ефективний з бактерицидної точки зору при довжині хвилі в 254 нм.

**Таблиця 1.** Види ультрафіолетового випромінювання

Найменування	Абревіатура	Довжина хвилі, нм	Кількість енергії на фотон, еВ
Близьке	NUV	400-300	3,10-4,13
Середнє	MUV	300-200	4,13-6,20
Далеке	FUV	200-122	6,20-10,2
Екстремальне	EUV, XUV	121-10	10,2-124
Вакуумне	VUV	200-10	6,20-124
Ультрафіолет А (довгохвильовий діапазон)	UVA	400-315	3,10-3,94
Ультрафіолет В (середній діапазон)	UVB	315-280	3,94-4,43
Ультрафіолет С (короткохвильовий, герміцидний діапазон)	UVC	280-100	4,43-12,4

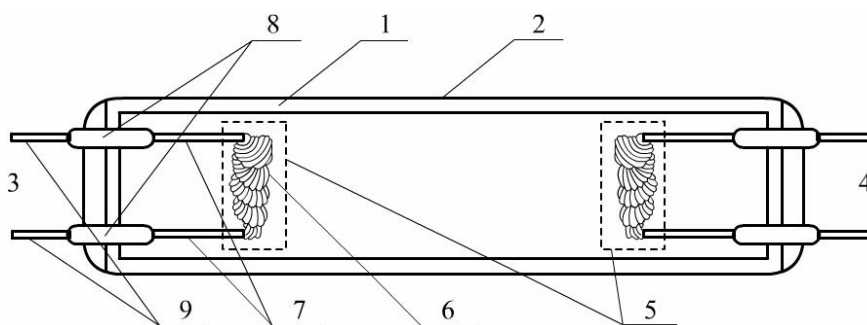
Живі мікробні клітини по різному реагують на ультрафіолетове випромінювання залежно від довжин хвиль [2].

Так, наприклад, відомі лампи для ультрафіолетового знезаражування, що містять колбу з увіолевого скла, усередині якого закріплені електроди, а колба заповнена аргонем з дозованою кількістю ртуті. При подачі достатньої напруги на електроди між ними виникає слабкострумний дуговий розряд в аргоні, який у міру випаровування ртуті переходить в розряд у парах ртуті, випромінюючи УФ спектр. Однак ККД бактерицидних ламп не перевищує 0,06%.

Недоліками такого рішення є складність стандартизації якості увіолевого скла в процесі його виготовлення та низька пропускання здатність короткохвильового випромінювання в діапазоні від 205 до 280 нм. Крім того, короткий термін служби лампи до втрати своїх бактерицидних властивостей обумовлений низькою стійкістю увіолевого скла до адгезії ртуті та окисним продуктам, що випаровуються з електродів у процесі горіння лампи, які осідають на внутрішню поверхню колби й знижують потужність випромінювання.

Найбільш досконалим рішенням є УФ лампа, будова якої представлена на рис. 1). Колба 1 якої виконана із кварцового скла і заповнена інертним газом з дозованою кількістю ртуті, із двома електродними збірками 3, 4 в складі електроду 5 з окисним покриттям, що знижують роботу виходу електронів, закріпленого між двома ніжками електроду 7. Кожна ніжка електроду 7 з'єднана

контактною електродною фольгою 8 з електродним контактом 9, заштампованими в колбу із протилежних кінців по фользі. Електроди електродних збірок 7 виконані з багатоскрученої спіралі 6, а на зовнішню поверхню колби лампи нанесене селективно-проникне кремній-титанове покриття 2. Завдяки удосконаленій конструкції вдалося усунути недоліки конструкцій ламп, наведених вище, а саме підвищити потужність бактерицидного випромінювання та виключити утворення озону в процесі роботи лампи.



- 1 – колба; 2 – кремній-титанове покриття; 3, 4 – електродні збірки;  
 5 – електрод; 6 – багатоскручені спіралі; 7 – ніжки електроду;  
 8 – електродна фольга; 9 – електродний контакт

**Рисунок 1.** УФ бактерицидна лампа

Бактерицидна ефективність ламп залежить, переважно, від дози випромінювання ( $D_{UV}$ , Дж/м<sup>2</sup>), застосованої до мікроорганізмів:

$$D_{UV} = I \cdot t, \quad (1)$$

де  $I$  – середня інтенсивність або доза опромінення, Дж/см<sup>2</sup>;  $t$  – час впливу, с.

Коефіцієнт виживання колоній мікробів, підданий впливу бактерицидного опромінення, експоненційно залежить від дози:

$$S = e^{kD_{UV}}, \quad (2)$$

де  $k$  – постійна дезактивації (інактивації), що залежить від конкретного виду колоній мікробів м<sup>2</sup>/Дж.

Отриманий коефіцієнт інактивації за один її прохід ( $\eta$ ) через поле випромінювання, використовується як показник загальної ефективності випромінювання та показує відсоток або частку колоній мікробів, інактивованих після одного проходу через поле опромінення, а також залежить від коефіцієнту  $S$  і завжди менше 1:

$$\eta = 1 - S. \quad (3)$$

Значення параметра  $k$  для багатьох видів бактерій, грибків, цвілі отримуються зазвичай експериментальним шляхом і можуть відрізнятись на кілька порядків. Це пов'язане із методами та умовами проведення вимірів: у повітряному потоці, у воді або на поверхні якої вони проводяться. На показання параметра  $k$  сильно впливає погрішність вимірювання рівня виживання мікробної культури. У зв'язку із цим, вибрати правильне значення  $k$  для умов проектування систем бактерицидного опромінення дуже важко, і, як правило, до застосування рівняння (2) ухвалюється середнє або максимальне з відомих значень  $k$  залежно від цілей знезаражування.

Як було сказано вище, відома велика кількість різноманітних за дією пристроїв знезараження повітря. Однак, найбільш перспективними слід вважати плазмові випромінювачі [1, 2], в яких надпотужним джерелом ультрафіолету є газорозрядна низькотемпературна плазма ( $T \sim 10^4$  K). Інтенсивне УФ випромінювання безперервного спектру випускає електрони в прискорювачі за рахунок магнітотормозного випромінювання релятивістських заряджених часток в однорідному магнітному полі. Пристрої для одержання потоків плазми називають плазмовими прискорювачами (ПП) – це клас плазмодинамічних пристроїв для одержання потоків плазми з енергією іонів від 10 eV і вище. На відміну від прискорювачів заряджених часток, у каналі ПП перебувають одночасно частки із зарядами обох знаків – позитивні іони та електрони. Це дозволяє одержувати квазістаціонарні (тривалістю від  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$  с) плазмові потоки з ефективним струмом іонів порядку мільйонів Ампер при енергії часток порядку 100 eV [2].

Напрямок розвитку плазмових випромінювачів можна охарактеризувати трьома завданнями:

- досягнення високих яскравостей;
- отримання інтенсивних світлових потоків;
- збільшення повної енергії випромінювання.

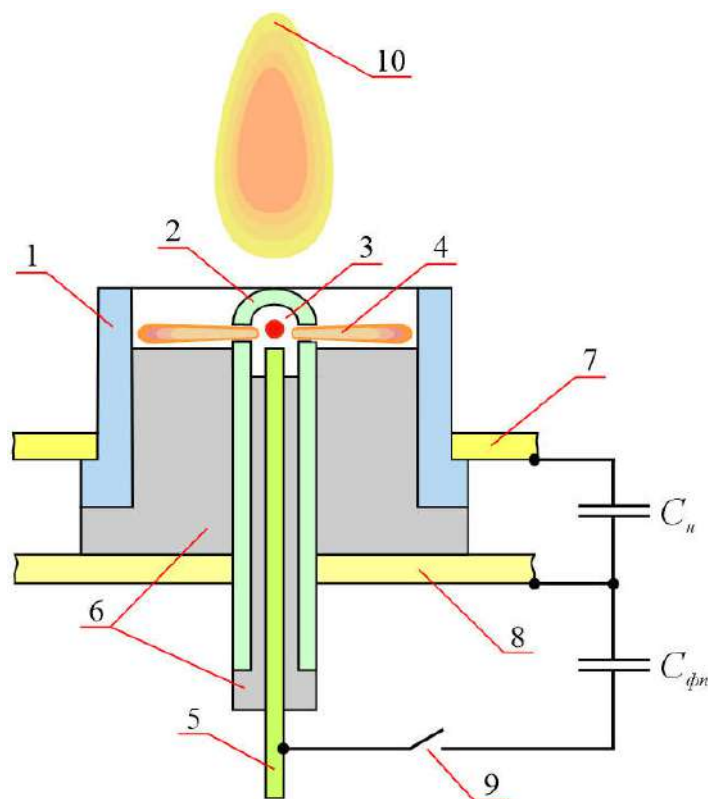
Найбільш перспективним для антибактеріальної та стерилізаційної обробки об'єктів різної фізичної природи є використання імпульсних оптичних джерел випромінювання ультрафіолетового діапазону, які є високоефективними стерилізаторами в широкій області застосувань. В основу таких джерел покладені коаксіальні плазмові прискорювачі торцевого типу (магнітоплазмові компресори – МПК), які працюють в імпульсному режимі. Джерелом енергії таких стерилізаторів є ємнісний накопичувач, що дозволяє генерувати струми порядку від  $10^5$  до  $10^6$  А при напрузі від 1 до 10 кВ [1, 2].

За рахунок істотного збільшення потужності УФ випромінювання такі стерилізатори мають ряд переваг у порівнянні із бактерицидними ртутними лампами, які широко використовуються в даний час.

Магнітоплазмовий компресор (МПК) працює в режимі періодично повторюваних атмосферних розрядів. Внаслідок таких розрядів утворюється згустки ударно-зжатої плазми, що є джерелом потужного УФ випромінювання. За рахунок істотного збільшення потужності УФ випромінювання такі

стерилізатори мають ряд переваг у порівнянні із бактерицидними ртутними лампами.

Типова схема коаксіального прискорювача плазми наведена на рис. 2. Магнітоплазмовий компресор (МПК) працює таким чином. Через отвори в центральному електроді 2 відбувається напуск плазми (форплазми) у торцеву область МПК 3. При замиканні ключа 9 починається розряд емнісного накопичувача  $C_n$  через плазмові перемички 4. Розряд у початковій стадії має поверхневий характер з частковою ерозією та іонізацією матеріалу діелектричної втулки.



а)

б)

- 1 – зовнішній електрод; 2 – центральний електрод; 3 – камера формування форплазми; 4 – плазмові струмені; 5 – додатковий електрод;  
6 – фторопластові ізолятори; 7 – листовий електрод накопичувача (анод);  
8 – листовий електрод накопичувача (катод); 9 – розрядник; 10 – плазмовий фокус

**Рисунок 2.** Зовнішній вигляд МПК з напуском форплазми

В міру зростання струму відбувається відрив ліній струму від поверхні діелектрика 6 і утворення струмово-плазмової оболонки у вигляді плазмового конуса 10 із надзвуковою швидкістю. Утворюється сконцентрований низькотемпературний плазмовий фокус у вигляді області ударно стисненої плазми в торцевій частині прискорювача, що власне і являє собою джерело потужного імпульсного електромагнітного випромінювання.

У створеній експериментальній установці з генерації та прискорення щільної плазми для енергоживлення використовується потужний ємнісний накопичувач, схема якого представлена на рис. 3. Максимальна величина струму обмежується впливом індуктивності конденсаторів ( $C_n$  і  $C_{\phi n}$ ) і паразитної індуктивності монтажу  $L$  (шинопроводів, які зв'язують електроди конденсаторів і плазмового прискорювача). Мінімізація індуктивності дозволяє реалізувати режим розряду накопичувача, близький до аперіодичного, і наблизитися до максимально можливих величин розрядних струмів експериментальних установок. Процес утворення плазми та її характеристик визначаються, крім того, параметрами плазмостворюючої речовини.

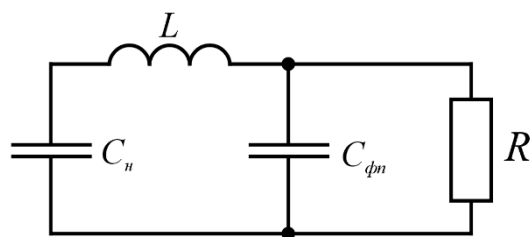


Рисунок 3. Спрощена схема МПК

Створена установка відкриває широкі перспективи здійснення високоефективної стерилізації на основі ультрафіолетового випромінювання, що характеризується потужною бактерицидною дією. Перевагою методу є фактично миттєва дія знезаражуючого фактору, висока імпульсна потужність ( $10^6$ - $10^9$  Вт) та ККД імпульсного випромінювача (порядку 75% і 7,4 % відповідно для УФ діапазону), дальність дії та ефективність.

Області застосування МПК УФ діапазону в якості пристрою інактивації патогенних мікроорганізмів можуть бути найрізноманітніші: медицина, транспорт, побут наука, промисловість, сільське господарство тощо (рис. 4).



Рисунок 3. Области застосування імпульсного оптичного джерела УФ випромінювання на основі магнітоплазмового компресора

### Список літератури

1. Чумаков В. І. Перспективи використання імпульсних оптичних джерел випромінювання ультрафіолетового діапазону для стерилізаційної обробки об'єктів / В. І. Чумаков, А. А. Таранчук, В. І. Стецюк // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції. – Одеса, 3-8.06.2013. – С. 130-131.

2. Vladimir Chumakov. A New Technology of Bactericidal Processing of Koch's Bacillus on the Basis of Pulsed Electromagnetic Radiation / Vladimir Chumakov, Alla Taranchuk, Viktor Stetsiuk, Viktor Michan // 2018 IEEE 38th International Conference on electronics and nanotechnology ELNANO-2018. – Kyiv, Ukraine, April 24-26, 2018. – P 271-276. INSPEC Accession Number: 18132713. DOI: 10.1109/ELNANO.2018.8477498. Publisher: IEEE.

Завідувачу кафедри телекомунікацій,  
медійних та інтелектуальних технологій  
(ТМІТ) Підченко С. К.

здобувача вищої освіти студента

2 курсу, гр. ЕКРм-24-1

Козицького Дмитра Володимировича

## ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіантах. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

15.12.2025 р.

Козицький Д. В.



РІШЕННЯ КАФЕДРИ  
**ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Імпульсний магнітно-плазмовий компресор для антибактеріальної та стерилізаційної обробки матеріалів

Автор: **Козицький Дмитро Володимирович**

Спеціальність: **172 Електронні комунікації та радіотехніка**

Освітня програма: **Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі**

Науковий керівник: **к.т.н., доц. Стецюк Віктор Іванович**

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<b><u>Відповідає</u></b>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: запозичення у розмірі 10% є випадковими збігами переважно із бібліографічним записом джерел посилань та типовими бланками, та не є плагіатом.

Відповідальний за контроль плагіату за системою Strike Plagiarism та Anti-Plagiarism (ХНУ):

15.12.2025 р.

  
Олег ПИВОВАР

Зав. каф. ТМІТ

15.12.2025 р.

  
Сергій ПІДЧЕНКО

# Anti-Plagiarism (UA) v-16.693

**The maximum coincidence with one document 2.0%**

**Dictionaries check: UA, US, RU. Errors in the documents: 71%**

ID: 253117 Title: Імпульсний магнітно-плазмовий компресор для антибактеріальної та стерилізаційної обробки матеріалів Added in a DB: 2025-12-15 Authors: Козицький Дмитро Володимирович Heads: Стецюк Віктор Іванович Consultants: Opponents:	Document		Sum coincidence on the DB	
	Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
	105756	1594	3100 (3%)	41 (3%)

## Plagiarism sources

ID	Description	Plagiarism presence in the document	
		Symbols	Lexemes

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Дмитро\_КОЗИЦЬКИЙ\_ЕКРМ-24-1

Співавтор:

Назва: ІМПУЛЬСНИЙ МАГНІТНО-ПЛАЗМОВИЙ КОМПРЕСОР ДЛЯ АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ ТА СТЕРИЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

Науковий керівник: Віктор СТЕЦЮК, к.т.н., доц.

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:10.2%

Коефіцієнт подібності 2:5.5%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 96

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-12-15 18:13:48.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Дата 15.12.25.

експерт

Віктор Стецюк  
Сергій Стецюк

## **ВІДГУК**

### **на дипломну роботу магістра Козицького Дмитра Володимировича «ІМПУЛЬСНИЙ МАГНІТНО-ПЛАЗМОВИЙ КОМПРЕСОР ДЛЯ АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ ТА СТЕРИЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ»**

Розробка пристроїв та приладів медичного застосування являється надзвичайно актуальною. В даному випадку це стосується стерилізаційної обробки поверхонь для запобігання поширення процесів розмноження та концентрації патогенної мікрофлори, що являються збудниками різноманітних захворювань. Дана робота полягає у підвищенні ефективності методу стерилізації об'єктів і середовищ на основі впливу імпульсного електромагнітного випромінювання ультрафіолетового діапазону.

Реалізація процесу стерилізації покладена на присрій генерування широкосмугових імпульсних випромінювань оптичного діапазону (а саме ультрафіолету) на основі магнітоплазмового компресора.

Під час виконання магістерської роботи студент Козицький Дмитро Володимирович з належною наполегливістю виконував всі поставлені задачі, зарекомендував себе кваліфікованим науковцем в області телекомунікацій та радіотехніки з глибокими системними теоретичними знаннями та добрими практичними навичками.

В цілому дипломна робота Козицького Д. В. «Імпульсний магнітно-плазмовий компресор для антибактеріальної та стерилізаційної обробки матеріалів» повністю відповідає вимогам до робіт магістерського освітнього рівня, заслуговує на оцінку "добре", а її автор – на присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка».

Науковий керівник



Стецюк В. І.

“ 15 ” грудня 2025 р.

## РЕЦЕНЗІЯ

### на дипломну роботу магістра Козицького Дмитра Володимировича «ІМПУЛЬСНИЙ МАГНІТНО-ПЛАЗМОВИЙ КОМПРЕСОР ДЛЯ АНТИБАКТЕРІАЛЬНОЇ ТА СТЕРИЛІЗАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ»

Робота присвячена підвищенню ефективності методу стерилізації об'єктів і середовищ на основі впливу імпульсного електромагнітного випромінювання ультрафіолетового діапазону.

Актуальність теми обумовлена надзвичайно широким попитом на медичне обладнання, особливо враховуючи реалії сьогодення.

В магістерській роботі ставиться та виконується ряд задач, серед яких:

- 1) провести аналітичний огляд існуючих рішень, здійснити класифікацію області застосування імпульсного оптичного джерела УФ випромінювання на основі магнітоплазмового компресора;
- 2) сформувавши математичний апарат генерування широкосмугових імпульсних випромінювань ультрафіолетового діапазону;
- 3) здійснити моделювання процесів імпульсного електромагнітного випромінювання у магнітоплазмовому компресорі;
- 4) здійснити апаратну реалізацію магнітоплазмового компресора на рівні функціональної схеми.

За змістом робота є докладною та містить достатньо посилань на літературу. Викладення матеріалу є послідовним та логічно правильним. Наведені у роботі формули, припущення та висновки мають достатнє обґрунтування та детальне пояснення. Мова викладення роботи є технічно грамотною, зрозумілою та не перенасиченою спеціальними термінами.

З точки зору оформлення магістерська робота представлена пояснювальною запискою, що складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на належному рівні.


Серед позитивних сторін магістерської роботи слід відмітити наступне:

- детально розроблений математичний апарат;
- наявність імітаційного моделювання;
- оригінальні апаратні рішення потужного імпульсного джерела ультрафіолетового діапазону на основі магнітоплазмового компресора.

До недоліків слід віднести наявність деяких орфографічних помилок та деяких професійних жаргонізмів.

Наприкінці необхідно відзначити, що дана робота Козицького Д. В. «Імпульсний магнітно-плазмовий компресор для антибактеріальної та стерилізаційної обробки матеріалів» повністю відповідає вимогам до робіт магістерського освітнього рівня, заслуговує на оцінку «добре», а її автор – на присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка».

Рецензент

  
Т. Гоборуніна, ректор ФІІТ

«15» грудня 2025 р.