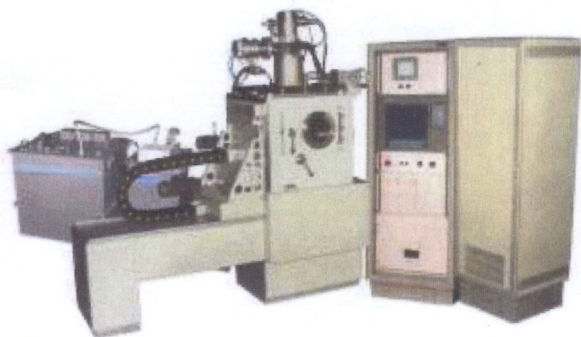


621.385(076)  
А87

**Т. Ф. Архіпова**

**ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ**



621.385(076)

A87

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Т. Ф. Архіпова**

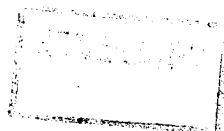
# **ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**Лабораторний практикум**



**621.385(076) A87 2017**

Архіпова Т.Ф. Електронно-променеві технології



Вінниця  
ВНТУ  
2017

УДК 621.38(075)

A87

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 22 грудня 2012 р.)

Рецензенти:

**В. М. Кичак**, доктор технічних наук, професор

**І. О. Сивак**, доктор технічних наук, професор

**С. Й. Ткаченко**, доктор технічних наук, професор

**В. Ф. Заболотний**, доктор педагогічних наук, професор

**Архіпова, Т. Ф.**

A87 Електронно-променеві технології : лабораторний практикум / Т. Ф. Архіпова. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 83 с.

Лабораторний практикум укладено відповідно до програми курсу «Електронно-променеві технології» для студентів спеціальностей: 131 – «Прикладна механіка»; 133 – «Галузеве машинобудування»; 153 – «Мікро- та наносистемна техніка»; 172 – «Телекомунікації та радіотехніка».

Лабораторний практикум може бути корисним також для спеціалістів, аспірантів й магістрів. Основне завдання – допомогти набутти практичних навичок у застосуванні теоретичних знань для вирішення конкретних технологічних задач з використання концентрованих потоків енергії.

УДК 621.38(075)

479598



## ЗМІСТ

	ВСТУП.....	4
1	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. Вивчення електронно-променевої технології.....	5
2	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. Вивчення методів одержання вакууму.....	15
3	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. Вивчення установки для електронно-променевого зварювання.....	27
4	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. Дослідження параметрів роботи електронної гармати.....	47
5	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. Дослідження роботи вакуумної установки «Булат-3Т».....	53
6	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. Захист від гальмівного рентгенівського випромінювання.....	58
7	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7. Техніка безпеки та вакуумна гігієна при роботі з устаткуванням і матеріалами вакуумної технології.....	64
	ГЛОСАРІЙ.....	73
	ЛІТЕРАТУРА.....	82

## ВСТУП

*Пам'яті  
Анатолія Олександровича  
Новікова присвячується*

Основне завдання лабораторного практикуму з дисципліни «Електронно-променевої технології» – вивчити особливості електронно-променевої технології, устаткування для електронно-променевого зварювання, методи отримання вакууму, дослідити параметри роботи електронної гармати та вакуумної установки «Булат-3Т». Метою лабораторного практикуму також є ознайомити студентів та магістрів з вимогами з техніки безпеки та вакуумної гігієни при роботі з устаткуванням і матеріалами вакуумної технології та допомогти набутти практичних навичок у застосуванні теоретичних знань для вирішення конкретних технологічних задач з використанням електронного променя як універсального інструменту з обробки матеріалів концентрованими потоками енергії.

В бібліографічний покажчик включено лише достатньо вживані та доступні широкому колу студентів підручники, монографії, оглядові статті та патенти. Посилання на оригінальні журнальні статті дано лише для випадку, коли питання, які були в них розглянуті, не увійшли в монографії або оглядові статті.

Автор висловлює глибоку вдячність рецензентам та колективу кафедри електроніки ВНТУ. Більшість їх зауважень враховано автором та сприяло поліпшенню посібника.

## ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

### Мета роботи

Ознайомитися з будовою електронно-променевого пристрою.

Ознайомитися з особливостями роботи технологічних електронних гармат з різноманітними типами емітерів.

Вивчити технологічні процеси, в яких використовується термічна електронно-променева обробка.

### Прилади та обладнання

Установка експериментальна МАС-1.

Термоелектронна гармата.

Газорозрядна електронна гармата.

Пристрій стабілізації та керування тиском в газорозрядній гарматі.

Мікроскоп МИМ-7.

Високовольтний блок живлення.

### Хід виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з конструкцією і технічними характеристиками електронно-променевої установки.

Завантажити в робочу камеру зразки для термічної обробки (зварювання, відпалювання, інших операцій відповідно до індивідуального завдання). Включити відкачні пристрої і відкачати робочу камеру і гармату до тиску не менше  $10^{-3}$  Па (для газорозрядної гармати  $P < 10^{-1}$  Па).

Користуючись координатним столом, встановити водоохолоджувальний колектор в зону електронного пучка і зняти такі залежності:

- для термокатодної гармати – емісійну характеристику і характеристику залежності струму електронного пучка від напруги на електроді керування;
- для газорозрядної гармати – вольт-амперну характеристику при заданому тиску в розрядній камері.

За допомогою координатного столу встановити зразок у фокусі електронного пучка (при зниженому струмі пучка) і здійснити термічну операцію відповідно до завдання.

Розгерметизувати камеру, вийняти зразок і здійснити контроль обробки під мікроскопом. Проаналізувати обробку зразків термокатодною і газорозрядною гарматами.

Виконати математичне оцінювання пробігу електронів в повітрі та в твердому тілі.

Скласти звіт по роботі.

# 1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Електронно-променева технологія

Протягом останніх 20 років сформулювалась самостійна наукова галузь – електронно-променева технологія. Можливі використання електронно-променевої технології знаходяться в межах від отримування субмікроскопічних структур в мікроелектроніці до виплавки великих зливків в металургії. Це пов'язано з великими можливостями і характерними перевагами електронного пучка як енергетичного інструмента. Можна виділити такі характерні особливості електронно-променевої технології:

- 1) Густина енергії в пучку може досягати  $10^7 \dots 10^8 \text{ Вт/см}^2$ , що дозволяє обробляти навіть тугоплавкі та хімічно-активні матеріали;
- 2) Діаметр пучка може досягати дуже малої величини (до часток мікрон), що дозволяє вести прецизійну обробку;
- 3) Процес обробки проходить в вакуумі, що виключає попадання в область обробки різних забруднень;
- 4) Легкість і безінерційність управління електронним пучком дозволяє здійснювати автоматизацію і програмування технологічних процесів;
- 5) Висока продуктивність процесів дозволяє використовувати їх у великосерійному і масовому виробництві.

Сутність процесу електронно-променевої дії полягає в тому, що кінетична енергія сформованого в вакуумі тим чи іншим способом електронного пучка, перетворюється в зоні зустрічі його з оброблюваним об'єктом в теплову. Електронний промінь відбивається і розсіюється поверхнею об'єкта, проте значна частина проходить на деяку глибину оброблюваної речовини і при цьому гальмується при взаємодії з електронами речовини. Це супроводжується нагріванням, вторинною електронною емісією, рентгенівським випромінюванням, виникненням дефектів в структурі кристалів та ін.

Ряд процесів, що протікають в твердому тілі при бомбардуванні прискореними електронами, використовується для технологічних цілей і складає основу електронно-променевої технології. До таких процесів належать: нагрівання при гальмуванні електронів в речовині, утворення дефектів в кристалічній решітці, стимулювання хімічних реакцій та ін. Деякі процеси, які не дають технологічного ефекту, використовуються для контролю за ходом технологічного процесу. Наприклад, вторинна емісія. Велика різноманітність ефектів, які відбуваються у твердому тілі під дією електронного бомбардування, обумовило широкий діапазон технологічних операцій, які виконуються за допомогою електронних пучків. Особливо широко для технологічних цілей використовується тепла дія електронного бомбардування. Електронно-променеві методи використовуються для плавлення металів в вакуумі, зонного чищення, зварювання, розмірної обробки тощо. Технологічні операції електронно-променевої технології

можна згрупувати в ряд методів, для яких загальним є характер процесів, що протікають у речовині при дії пучків електронів:

- 1) Методи електронного нагрівання в основі яких полягають теплові процеси, що не призводять до руйнування речовини (знегажування, відпал і плавлення матеріалів, зварювання і паяння деталей з різних матеріалів);
- 2) Електронно-ерозійні методи, основані на руйнуванні і віддаленні його частинок з утворюванням отворів, каналів тощо (розмірна обробка, випарювання для отримання плівок);
- 3) Методи, які використовують радіаційну дію електронних пучків, що визивають зміни будови кристалів і виникнення дефектів в твердому тілі (прискорення дифузії, зміна фізичних властивостей поверхні тощо);
- 4) Методи, основані на хімічній дії електронних пучків, що проявляється в стимулюванні процесів дисоціації складних хімічних з'єднань і прискоренні процесів полімеризації (знегажування поверхонь, отримання металевих і полімерних плівок, електронна літографія).

Параметрами, що характеризують той чи інший процес електронно-променевої технології, в першу чергу є: потужність електронного пучка  $P_0$ , питома поверхнева потужність в точці на об'єкті (потужність пучка на одиницю площі його поперечного перерізу)  $P_0$ , прискорювальна напруга  $U_B$ , струм пучка  $I_B$  і діаметр пучка в точці зустрічі його з об'єктом  $d_f$ .

Потужність пучка  $P_0$  визначається як добуток прискорювальної напруги  $U_B$  на струм пучка  $I_B$ .

$$P_0 = U_B \cdot I_B.$$

Питома поверхнева потужність пучка в точці зустрічі з поверхнею об'єкта

$$P_0 = \frac{U_B \cdot I_B}{F_B} = \frac{4U_B \cdot I_B}{\pi d_0^2} = U_B \cdot j,$$

де  $j$  – густина струму пучка в точці зустрічі з поверхнею об'єкта;

$d_0$  – відстань між електродами.

Вимоги до перелічених параметрів в різних процесах електронно-променевої технології дуже відрізняються [1, 15, 16]. Така велика кількість вимог до параметрів електронних пучків обумовила і велику різноманітність технічних рішень пристроїв формування і проведення пучків в електронних гарматах.

## 1.2 Електронні гармати та їх основні характеристики

Електронною гарматою називається пристрій, призначений для отримання вільних електронів, їх прискорення, формування в пучок і проведення пучка до об'єкта обробки. Для отримання електронів використовуються термоелектронні, плазмові або холодні емітери. У вузлі формування



пучка електрони прискорюються в електростатичних полях і формуються в пучок. Вузол променевого служить для проведення пучка до оброблюваного об'єкта. Для проведення пучка використовуються зазвичай магнітні лінзи фокусування і системи відхилення.

В залежності від задач конкретних процесів електронно-променевої технології використовуються гармати, які за потужністю пучків, а, отже, за прискорювальною напругою і струмом пучків, а також за питомою поверхневою потужністю, тобто за діаметрами пучків відрізняються на декілька порядків. Розроблено багато різних видів гармат, які за своїми параметрами і за технічним виконанням відповідають специфіці процесів електронно-променевої технології.

Найбільше використання отримали термокатодні гармати, які основані на електронній оптиці Пірса: довгофокусні гармати для отримання пучка мінімального діаметра, гармати з кільцевим потоком електронів і ін. [6, 9, 11, 17]. Як матеріали катода в термокатодних гарматах використовуються тугоплавкі метали і сплави (вольфрам, тантал, гексаборид лантана). Досягнута при цьому густина струму емісії  $j_e$  таких катодів є складною функцією від температури  $T$ :

$$j_e = A \cdot T^2 \cdot e^{-\phi/kT},$$

де  $A$  і  $\phi$  – константи, які залежать від матеріалу катода.

Верхня межа використовованого діапазону густини струму емісії термокатодів залежить від термостійкості і швидкості випаровування матеріалу при високій температурі і складає в більшості випадків  $1 \dots 10 \text{ А/см}^2$ .

Важливим експлуатаційним показником катода є його термін придатності. Термін придатності термокатодів обмежується процесами розпилення і випаровування матеріалу. Залежно від режимів роботи і умов проведення технологічних процесів термін придатності масивних катодів може досягти кілька сотень годин.

Катод, електрод керування і анод складають *електростатичний генератор електронного пучка*. Якщо електрод керування знаходиться під потенціалом катода, то генератор називається двоелектродним, а якщо потенціали електрода керування і катода різні – триелектродним. Для будь-якого типу генератора є дійсним вираз для первеансу  $I_B = pU_B^{3/2}$ . При збільшенні струму пучка, різко збільшуються витрати потужності на анодній діафрагмі, які були викликані збільшенням діаметра пучка.

Генератор повинен забезпечувати можливість керування струмом пучка в широких межах. Якщо катод генератора працює в режимі насичення, то керувати струмом пучка можна, змінюючи температуру катода. Таке керування звичайно використовується в двоелектродних генераторах. В триелектродних генераторах струм пучка регулюють за рахунок зміни напруги електрода керування при незмінній напрузі.

Проведення створеного генератором пучка здійснюють шляхом фокусування і відхилення, використовуючи принципи електронної оптики. Для фокусування, як правило, використовують симетричні магнітні поля, створені магнітними лінзами. В технологічних гарматах використовуються короткофокусні магнітні лінзи, які дозволяють зведення електронного пучка в пляму дуже малого діаметра. Відхилення електронних пучків частіше всього здійснюють за допомогою простих або схрещених двополосників. Для відхилення пучка на великі кути, використовують системи, які створюють секторні магнітні поля. Термокатодні гармати формують електронні пучки з питомою потужністю більше  $10^6 \text{ Вт/см}^2$ , а загальна потужність пучка цих гармат може складати десятки-сотні кіловат.

Для стабільної роботи термокатодних гармат необхідний вакуум не менше  $10^{-2} \text{ Па}$ . Тому для роботи у низькому вакуумі, а особливо з використанням активних газових середовищ, використовуються гармати з нержарюваними катодами. Одними з них є газорозрядні електронні гармати на основі високовольтного тліючого розряду з прианодною плазмою.

Робота газорозрядних електронних гармат з холодним катодом і прианодною плазмою базується на використанні променевої форми високовольтного тліючого розряду, який виникає при тисках одиниці-сотні паскалів, коли в розряді переважає направлений рух заряджених частинок над хаотичним. Емісія електронів з холодного катода здійснюється під дією бомбардування його поверхні іонами і швидкими нейтральними частинками. Позитивні іони емітуються прианодною плазмою, яка створюється в результаті іонізації газу електронами, прискореними в полі катодного падіння потенціалу. Швидкі нейтральні частинки створюються в результаті перезарядки іонів. Між плазмою і областю катодного падіння потенціалу є різко виявлена межа, яка є прозорим анодом, тобто плазма квазінейтральна, і її потенціал близький до потенціалу анода.

Як матеріал холодного катода в газорозрядних електронних гарматах з прианодною плазмою найбільш часто використовують алюміній, який має порівняно високий коефіцієнт іонно-електронної емісії, завдяки окисній плівці на його поверхні. Можуть використовуватись і інші матеріали і сплави. Через невелику величину коефіцієнта іонно-електронної емісії з холодного катода густина струму електронної емісії не перевищує  $0,1 \text{ А/см}^2$ . Це обумовлено використанням катодів з великою емісійною поверхнею, з якої виходять електронні пучки. Термін служби таких катодів визначається часом розпилення поверхневого шару до величини, яка призводить до недопустимих змін геометричних параметрів в пучку і складає сотні ампер-годин.

В гарматах з великою анодною апертурою конфігурація плазмової межі подібна формі катода. Простота холодних катодів і наявність прозорого плазмового анода дозволяють відносно легко формувати профільні електронні пучки різної конфігурації.

Керування струмом пучка в газорозрядних електронних гарматах при незмінній прискорювальній напрузі здійснюється регулюванням параметрів плазми. Для цієї мети використовують системи керування тиском в розрядній камері гармати або електроди керування, які дозволяють збуджувати допоміжний розряд і змінювати, таким чином, концентрацію плазми, а, отже, і струм пучка.

Проведення пучків газорозрядних електронних гармат в зону обробки здійснюють, використовуючи ті ж принципи електронної оптики, що і для термокатодних гармат. В гарматах, що формують пучки з точковим фокусом, використовують короткофокусні магнітні лінзи, а в гарматах з профільними пучками, що працюють в основному в режимі коротких імпульсів, частіше використовують лише електростатичне фокусування. При цьому виріб розміщують в фокусі пучка, що сформований в розрядному проміжку.

Величина струмів, які забезпечуються газорозрядними гарматами, складає сотні міліампер – одиниці ампер, загальна потужність звичайно не перевищує десятки кіловат, а питома потужність складає біля  $5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2$ . Потужність гармат, які формують профільні пучки, може досягати сотні кіловат, водночас питома потужність при цьому не перевищує  $10^4 \text{ Вт/см}^2$ .

### 1.3 Опис лабораторного пристрою

#### 1.3.1 Будова і основні елементи електронно-променевого пристрою

Для виконання технологічних операцій використовують універсальні і спеціалізовані електронно-променеві пристрої. Універсальні пристрої забезпечують виконання операцій, які потребують гнучкого керування параметрами електронного пучка і його просторового розташування. Продуктивність таких пристроїв низька. Спеціалізовані пристрої пристосовані для обробки конкретних виробів відрізняються високою продуктивністю, завдяки використанню завантажувальних пристроїв періодичної або неперервної дії, а також максимальної автоматизації процесу обробки. В загальному випадку *електронно-променевий технологічний пристрій* вміщує такі елементи: електронну гармату, вакуумну камеру, систему відкачування, високовольтне джерело живлення гармати, системи керування і контролю за роботою вузлів гармати і процесами обробки.

Лабораторний пристрій універсальний і призначений для дослідження характеристик і параметрів електронних гармат і технологічних процесів, які виконані з їх допомогою. Принципова схема пристрою наведена в [19]. Пристрій складається з робочої камери, електронної гармати (термокатодної або газорозрядної), систем відкачування, високовольтного джерела живлення, систем керування і контролю параметрів гармати і виконаної операції.

Робоча камера пристрою являє собою куб розміром  $500 \times 500 \times 500 \text{ мм}$ , виготовлений з маловуглецевої сталі. На передній і бокових стінках є

вікна, загерметизовані кришками з ілюмінаторами і фланцем з електричними вводами. Зверху камери встановлюється електронна гармата. В камері розташований координатний стіл, на якому розміщений водоохолоджуваний колектор і зразки, що обробляються. В пристрої використовуються дві системи відкачування, які забезпечують отримання і підтримку тиску  $10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ Па}$  в робочій камері і  $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ Па}$  в гарматі. Незалежний спосіб відкачування дозволяє підтримувати в гарматі більш високий і стабільний вакуум, що дуже важливо для роботи термокатодної гармати. Електричне живлення гармати здійснюється від високовольтного джерела живлення на  $30 \text{ кВ}$  при струмі навантаження до  $0,2 \text{ А}$ . Котушки магнітних лінз підключають до універсальних джерел постійного струму.

### 1.3.2 Конструкції електронних гармат

Термокатодна електронна гармата широко застосовується в електронних моніторах комп'ютерів, телевізорів, осцилографів, електронних мікроскопах, а також як інжектор (джерело) електронів в прискорювачах. Дж. Дж. Томпсон (Joseph John Thomson) розташував катодну гармату в однорідному магнітному полі. Схема термокатодної електронної гармати подана в [16, 17] (рис. 1.1).

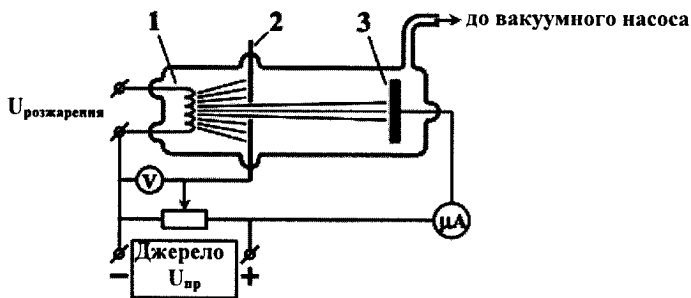


Рисунок 1.1 – Термокатодна електронна гармата

Електродна система гармати розташована в герметичному циліндричному корпусі. Катодний вузол гармати містить в собі вольфрамовий катод 1, який являє собою вольфрамову спіраль. Електрод 2 забезпечує керування струмом електронного пучка. Катодний вузол закріплений на стержневих керамічних ізоляторах, які забезпечують осьове його розташування відносно анода 3 та ізоляцію від корпусу.

В конструкціях сучасних гармат лінзи фокусування і відхилення кріпляться до корпусу гармати знизу. Гармата встановлюється в робочій камері пристрою нерухомо, а суміщення електронного пучка з оброблюваним зразком здійснюється за допомогою системи відхилення і координатного столу. Керування струмом пучка виконується наданням негативного

потенціалу в кілька кіловольт на електрод керування гармати. При прискорювальних напругах до 30 кВ гармата формує довгофокусний електронний пучок з питомою потужністю  $10^6 \text{ Вт/см}^2$ .

Конструкція газорозрядної електронної гармати з холодним катодом, яка формує аксіально-симетричний пучок з точковим фокусом, подана в [13] (рис. 1.2). Електродна система гармати складається з алюмінієвого катода 3, поверхня емітування якого виконана у вигляді частини сфери і конічного анода 4. Для відведення тепла від катода, який нагрівається в результаті іонного бомбардування, використовують підтримувач з водоохолодженням. Це дозволило використовувати в гарматі високовольтний ізолятор 1 з полімерного матеріалу.

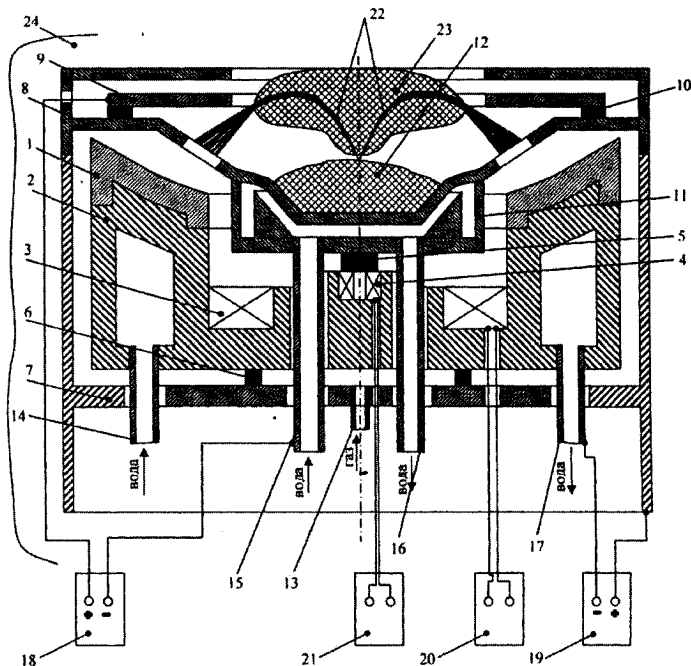


Рисунок 1.2 – Газорозрядна електронна гармата

Катодний вузол і конічний анод розташовані в циліндричному корпусі гармати 5, до нижчої частини якого приєднана основа 6 з променеводом 7, на якому встановлена магнітна лінза фокусування 8. Для запобігання від перегріву корпусу гармати і лінзи фокусування електронами пучка в основі передбачено водяне охолодження. Гармата використовується в стаціонарному варіанті. Система відхилення в гарматі не передбачена, тому суміщення

оброблюваного зразка з пучком проводиться координатними столами. При напругах прискорювання до 25 кВ гармата формує електронний пучок з питомою потужністю  $10^5 \text{ Вт/см}^2$ .

Керування струмом пучка в газорозрядній камері здійснюється зміною тиску за допомогою автоматичної системи напуску газу. Схема системи керування наведена в [9]. Подача робочого газу в гармату здійснюється через штуцер в її корпусі за допомогою електромагнітного натікача, керованого електронним блоком. Як датчик вхідного сигналу при автоматичному регулюванні використовується резистор, включений послідовно з гарматою і високовольним джерелом живлення, або напруга з виходу вакуумметра ВИТ-3. Система забезпечує повільне регулювання струму гармати по всьому робочому діапазону і його стабілізацію на заданому рівні при неперервному відкачуванні. Оскільки відкачування газу з гармати здійснюється через вакуумну камеру, то в ній в цьому випадку буде підтримуватись тиск близько  $10^{-2} \text{ Па}$ , що на два порядки вище, ніж при роботі термокатодної гармати.

### **Зміст звіту**

Завдання по роботі.

Розрахунок енергетичних характеристик електронного пучка.

Схеми пристроїв.

Таблиці результатів випробування і графіки.

Висновки відповідно до отриманих результатів індивідуального завдання.

### **Контрольні запитання**

1. Опишіть фізичну сутність термічної обробки електронним променем.
2. Які можливості електронного променя як енергетичного інструмента ви знаєте?
3. Назвіть енергетичні параметри електронного променя.
4. Опишіть основні вимоги до параметрів електронного променя в залежності від технологічного процесу.
5. Умови роботи технологічних гармат.
6. Які показники вакууму необхідні для забезпечення роботи?
7. Як побудована термоелектронна гармата?
8. Як побудована газорозрядна електронна гармата?

9. Опишіть процеси, які відбуваються при взаємодії електронного променя та речовини.
10. Чим обмежується термін служби термоелектронного і холодного катодів?
11. Назвіть правила техніки експлуатації та безпеки при роботі з технологічними електронно-променевими пристроями.
12. Назвіть способи регулювання потужності електронного пучка в гарматах з різними емітерами.
13. Характерні особливості газорозрядної електронної гармати.
14. Назвіть основні вузли електронно-променевої установки, їх призначення.
15. Опишіть принцип роботи системи керування струмом пучка газорозрядної електронної гармати.
16. Які термічні операції, виконані електронним пучком, ви можете назвати? Їх особливості.
17. В яких процесах електронно-променевої технології доцільно використовувати термокатодну гармату, а в яких – газорозрядну?
18. Чим відрізняються універсальні електронно-променеві установки від спеціалізованих?

## ВИВЧЕННЯ МЕТОДІВ ОДЕРЖАННЯ ВАКУУМУ

### Мета роботи

Вивчити устаткування і матеріали для одержання вакууму:

- а) склад і принцип дії механічних обертальних вакуумних насосів із маляним ущільненням;
- б) параметри робочих рідин для вакуумних насосів;
- в) ознайомитися з складом та параметрами дифузійних паромасляних насосів, ознайомитися з параметрами робочих рідин для них;
- г) засвоїти прийоми роботи на індивідуальному вакуумному посту.

### Прилади й устаткування

1. Індивідуальний відкачувальний пост ВА-2-3.
2. Форвакуумний пластинчасто-роторний насос 2НВР-5ДМ.
3. Дифузійний насос.
4. Зразки форвакуумних масел ВМ-4, ВМ-6.
5. Зразки дифузійних масел ВМ-1, ПМФС-2.
6. Вакуумметр ВТ-2П.
7. Віскозиметр.
8. Секундомір.

### Хід виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з вакуумним агрегатом ВА-2-3.
2. Засвоїти методику вмикання та вимикання вакуумної схеми.
3. Перевірити стан елементів комутування вакуумної схеми.
4. Включити обертальний насос попереднього розрядження.
5. Провести контроль вакуумметричних датчиків і вимірити вакуум.
6. При досягненні вакууму  $10 \text{ Па}$  подати на дифузійний насос холодну воду і включити нагрівач кип'ятильника.
7. Зафіксувати час розгону дифузійного насоса.
8. Довести тиск у камері до  $10^{-1} \text{ Па}$ .
9. Відключити дифузійний насос.
10. Зняти криву зміни тиску в робочій камері  $P(t)$  при відключенні насосів.
11. Після охолодження дифузійного насоса перекрити воду, закрити усі вентилі, виключити форвакуумний насос і напустити в нього повітря.
12. Вимкнути напругу живлення.



## 2.1 Теоретичні відомості

### 2.1.1 Фізичні основи одержання вакууму

#### 2.1.1.1 Класифікація ступеня вакууму

Критерієм градації вакууму є відношення, назване *критерієм Кнудсена*:

$$K_n = K_c/K_M = L/d_{\text{эф}},$$

де  $L$  – довжина вільного пробігу молекул газу;

$d_{\text{эф}}$  – ефективний розмір камери;

$K_c$  – частота зіткнень молекул газу зі стінками;

$K_M$  – частота зіткнень молекул газу між собою.

Низький вакуум –  $K_n \ll 1$ ;       $K_c \ll K_M$ .

Середній вакуум –  $K_n \approx 1$ ;       $K_c \approx K_M$ .

Високий вакуум –  $K_n \gg 1$ ;       $K_c \gg K_M$ .

#### 2.1.1.2 Режим течії газів

Розрізняють такі види режиму течії газів:

1. *В'язкісний режим течії газу*. Розподіл швидкостей у поперечному перерізі визначається силами внутрішнього тертя. Критерій Кнудсена:  $K_n \leq 5 \cdot 10^{-3}$ .
2. *Молекулярний режим течії газу*. Швидкість переміщення окремих молекул стала. Критерій Кнудсена:  $1,5 < K_n \leq \infty$ .
3. *Молекулярно-в'язкісний режим*. Це проміжний режим між в'язкісним і молекулярним:  $5 \cdot 10^{-3} < K_n \leq 1,5$ .

Іншим більш практичним критерієм роду течії газу є величина  $p \cdot d$ . Якщо тиск виразити в *мТорр* (1 *Торр* = 1 мм рт. ст. = 133 Па), діаметр трубопроводу  $D$  виразити в *см*, тоді для повітря:

- молекулярний режим течії спостерігається при  $p < 20/D$ ,  $p_{\text{ср}} < 2$  [Па·см],
- в'язкісний режим – при  $p > 500/D$ ,  $p_{\text{ср}} < 2$  [Па·см],
- молекулярно-в'язкісний режим течії газу має місце при  $D \rightarrow d$ ;  $500/D > p > 20/D$  та  $66,5 > p_{\text{ср}} D > 2$  [Па·см].

### 2.1.2 Опір елементів вакуумного каналу течії газу

#### 2.1.2.1 В'язкісний режим

Провідність циліндричної труби для повітря при кімнатній температурі:

$$U = I/(p_2 - p_1) = Q \cdot t / (p_2 - p_1) \approx (1,37 \cdot 10^3 \cdot D^4 \cdot p_{\text{ср}}) / L, \text{ [м}^3/\text{с]}$$

де  $p_{\text{ср}}$  – середній тиск  $p_{\text{ср}} = (p_1 + p_2) / 2$ , Па ;

$D$  – діаметр труби, м;

$L$  – довжина труби, м.

### 2.1.2.2 Молекулярний режим

Провідність довгої труби круглого перерізу для молекулярного режиму (при  $L/D \gg 4/3$ ):

$$U_m = (1,217 \cdot 10^4 \cdot D^3)/L, [\text{см}^3/\text{с}]; \quad U_m = (121,7 \cdot D^3)/L, [\text{м}^3/\text{с}].$$

### 2.1.2.3 Опір вигинів трубопроводів

Опір вигинів трубопроводу на кут  $90^\circ$  більше впливає при в'язкісному режимі течії, ніж при молекулярному. Для врахування впливу вигинів до довжини трубопроводу додають величину:

$$\alpha \approx 1,33 \cdot n \cdot D,$$

де  $n$  – кількість вигинів під кутом  $90^\circ$ .

Провідність труб при проміжній течії газів визначається виразом:

$$U_{\text{мв}} \approx 10 \cdot (D^3/L) \cdot (1 + 0,018p) \approx 121,5 \cdot (D^3/L) \cdot (1,5 \cdot 10^3 \cdot D \cdot p_{\text{ср}} + 0,9), [\text{м}^3/\text{с}],$$

де  $p_{\text{ср}}$  – середній тиск [мм рт. ст.];

$p$  – тиск у трубопроводі [мм рт. ст.];

$D$  – діаметр труби, [м];

$L$  – довжина труби, [м].

### 2.1.2.4 Опір вентилів і пасток

Провідність вентиля складає  $0,5 \div 0,7$  провідності отвору з діаметром, рівним діаметру умовного проходу вентиля або клапана.

Опір пастки приймається приблизно  $0,1$  від опору вакуумного каналу.

## 2.1.3 Схема вакуумного поста

Основним елементом установки для одержання зниженого тиску (вакууму) є вакуумний насос, за допомогою якого відбувається видалення газів із заданого об'єму [5, 8]. Схема вакуумного поста показана на рис. 2.1. Для з'єднання відкачуваного об'єму з насосами служить комплекс пристроїв і приладів – *вакуумний канал*. Основу його складають вакуумні трубопроводи, елементи комутування, пристрої для підвищення ступеня вакууму та прилади для його контролю і вимірювання. В початковий момент тиск в системі дорівнює атмосферному. Насос попереднього (форвакуумного) розрідження 1 через триходовий вентиль 4 має забезпечити форвакуум в камері 7 та в дифузійному насосі 2.

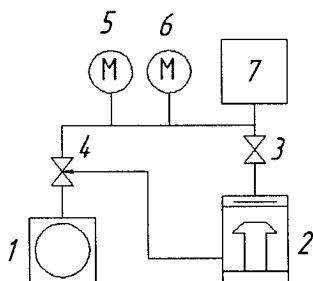


Рисунок 2.1 – Схема вакуумного поста

При постійній роботі насоса 1 вмикається високовакуумний пароструминний дифузійний насос 2. За умови виходу на робочий режим насоса 2, відкривається вентиль 3 і перемикається вентиль 4. Контроль форвакуумного тиску забезпечується ПМТ-2 (поз.5). Контроль високого вакууму здійснюють за показниками лампи датчика вакуумметра ПМІ-2 (поз. 6).

### 2.1.3.1 Механічний насос

Механічні насоси створюють у вакуумній системі *попередній вакуум (форвакуум)*. Представником таких насосів у досліджуваній вакуумній системі служить насос типу ВМ-1МГ. Основні характеристики форвакуумного насоса подано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики насоса ВМ-1МГ

Характеристика	Значення
Число ступенів	2
Швидкість дії в діапазоні $10^5 \dots 10^2$ Па, [ $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ ]	0,0165
Граничний тиск, Па	
– з газовим баластом;	33,3
– без газового баласту;	3,16
– парціальний до повітря	0,49
Максимально впускний тиск парів води, Па	532
Число обертів ротора, об/хв	500
Робоче масло	ВМ-4, ВМ-6
Кількість масла, що заливається в насос, л	3,8
Потужність електродвигуна, кВт	2,8
Маса насоса з приводом, кг	290

За конструктивним виконанням насос являє собою комбінацію поршньового і пластинчасто-статорного насосів (рис. 2.2).

Основною деталлю насоса є плунжер, що складається з порожнистої пластини 1, закріпленої на обоймі 2 і ротора 3, що ексцентрично сидить на валу 4. Пластина, що виконує роль поршня, у верхній частині сполучена з циліндричним золотником 5, що забезпечує вільне хитання і зворотно-поступальне прямування плунжера. При обертанні ротора обойма ковзає по ньому, а плунжер ковзає внутрішньою поверхнею статора, що знижує нагрівання насоса. В міру обертання ротора об'єм всмоктувальної порожнини збільшується. Відбувається всмоктування газу. Вихлопна порожнина зменшується, у той же час і відбувається стиснення газу і перехід у всмоктувальну порожнину другого ступеня. Другий ступінь насоса працює аналогічно, тільки виштовхування стиснутого газу відбувається в атмосферу через клапан 7.

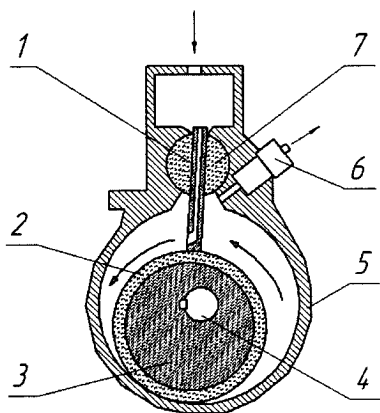


Рисунок 2.2 – Схема плунжерного насоса

Для змащування поверхонь, що підпадають тертю, і поліпшення герметичності, масло подається в невеличких кількостях до сальників головного вала й у робочу камеру по спеціальних маслопровідних трубках.

Насос ВМ-1МГ для ефективного відкачування парів, що конденсуються, має газобаластний склад, який служить для заповнення газом камери стискання перед вихлопом. Подача порції атмосферного повітря знижує тиск парогазової суміші і запобігає конденсації пари.

### 2.1.3.2 Форвакуумні масла

Для обертальних насосів застосовують спеціальні масла, що повинні мати:

- 1) Низький тиск насиченої пари при робочій температурі;

- 2) Достатню текучість;
- 3) Добрі змащувальні властивості;
- 4) Високу вологостійкість (не розчиняти газ, що відкачується);
- 5) Хімічну інертність стосовно кисню (не взаємодіати з конструкційними матеріалами насоса);
- 6) Високу термостійкість.

Перерахованим вимогам відповідають масла ВМ-4 і ВМ-6. Масло ВМ-4 одержують шляхом вакуумної сепарації машинного масла марки СУ. Воно неоднорідне за складом та являє собою суміш вуглеводів із різною молекулярною масою і температурою кипіння. Волого- і термостійкість масла ВМ-4 невисокі. Масло ВМ-6 – продукт високовакуумної дистиляції машинного масла марки С має більш вузький фракційний склад, не містить летючих фракцій, в'язкість масла менше залежить від температури, ніж у ВМ-4. Параметри деяких форвакуумних масел зведені в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристика форвакуумних масел ВМ-4 та ВМ-6

Характеристика	ВМ-4	ВМ-6
Вихідні дані	машинне масло СУ	машинне масло С
Пружність парів, <i>мм рт. ст.</i>	$5 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-9} \dots 3 \cdot 10^{-7}$
Граничний залишковий тиск, <i>мм рт. ст.</i>	$10^{-2}$	$10^{-3}$
В'язкість кінематична при $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\text{м}^2/\text{с}$	370...385	165...215
Межі температур дистиляції, $^\circ\text{C}$ , – початок; – кінець (90 %)	130 245	140...165 190...210
Термостабільність із підвищенням в'язкості при $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , %	95...100	15...50
Вологостійкість, %	0,6...0,8	0,2...0,3
Температура спалаху, $^\circ\text{C}$	206...230	220...230
Температура затвердіння, $^\circ\text{C}$	-20	-15

### 2.1.4 Високовакуумний насос

Як високовакуумний насос в промислових установках використовуються дифузійні паромасляні насоси. Вони працюють при вхідних тисках  $p_{\text{вх}} = 0,1 \text{ Па}$ . Для цих насосів необхідне попереднє розрідження, що забезпечують форвакуумні насоси.

Конструктивно паромасляний насос складається з циліндричного корпусу з вхідним і вихідним патрубками. На дні корпусу є радіальні канавки (лабіринт), що служать для розгонки масла на фракції. У залежності від кількості ступенів у корпус вставляються сопла у вигляді співвісних циліндрів. Кожне сопло має відбиваючу парасольку, що спрямовує струмінь масляної пари. Легкі фракції масла починають випаровуватися в першому соплі (найбільш віддаленому від центра корпусу), а важкі фракції випаровуються

з центрального сопла (високовакуумного). Випаровування важких фракцій із центрального сопла забезпечує низький граничний залишковий тиск і високу швидкодію, а сопло, що працює на легкій фракції, забезпечує підвищений випускний тиск. Для забезпечення конденсації парів корпус забезпечений водяною сорочкою. Для підігріву масла служить кип'ятильник, розташований під дном насоса. У струмені пари, що вийшла з-під сопла, парціальний тиск близький до нуля. Тому газ дифундує у струмінь масляної пари і захоплюється нею в нижню частину корпусу, де пари масла конденсуються на охолоджувальних стінках. Сконденсоване масло стікає знову в область нагрівання. Граничний тиск насоса залежить від вмісту газу в маслі. Для кращого знегажування масла сорочка водяного охолодження робиться укороченою, відстань по стінці між водяною сорочкою і кип'ятильником збільшується. Температура стінок корпусу в цій області досягає 140 °С, що сприяє поліпшенню знегажування масла. Іноді для збільшення часу перебування масляного конденсату на стінках із підвищеною температурою робиться спіральна канавка, що починається біля нижнього краю водяної сорочки і закінчується в кип'ятильнику. Для усунення влучення бризок на вхід насоса ставляться щитки відбиття, що усувають пряму видимість кип'ятильника з входу насоса.

Вода у водяну сорочку подається знизу і розподіляється, починаючи з верхньої частини насоса.

#### 2.1.4.1 Основні характеристики паромасляного високовакуумного агрегату ВА-2-3

Серед основних характеристик паромасляного високовакуумного агрегату слід виділити такі дані:

1. Середня швидкість дії (при $p = 10^{-5} \dots 10^{-4}$ мм рт. ст.), л/с	500
2. Граничний вакуум, мм рт. ст.:	
– з азотною пасткою	$5 \cdot 10^{-7}$
– без пастки	$5 \cdot 10^{-6}$
3. Найбільший випускний тиск, мм рт. ст.	0,1
4. Витрата води на охолодження, л/год	200
5. Витрата рідкого азоту, л/год	1,0
6. Тип високовакуумного насоса	H-2T
7. Тип форвакуумного насоса	8H-2MГ
8. Діаметр умовного проходу вхідного патрубку, мм	260
9. Маса агрегату, кг	200
10. Кількість робочої рідини, г	500
11. Потужність нагрівача, кВт	0,7

У дифузійних промислових насосах застосовуються три типи робочих рідин:

- мінеральні масла (ВМ-1, ВМ-2, ВМ-5, ВМ-7);
- силіконові масла (ПЕС-В-1, ПЕС-В-2, ПФМС-2, ФМ-1);
- складні ефіри (ОФ, ОС, 5ФЧЕ).

Мінеральні масла не термостійкі, мають багатofракційний склад. Масло ВМ-1, ВМ-2, ВМ-5 являють собою продукт високовакуумної дистиляції медичного вазелінового масла. Для одержання масла ВМ-7 служить турбінне масло. Масло ВМ-7 має підвищену окисну стійкість. Основні властивості рідин для дифузійних паромасляних насосів зведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні властивості рідин для дифузійних паромасляних насосів

Масло	Густина при 20°C, г/см <sup>3</sup>	Пружність пари при 20°C, Мм рт. ст.	Граничний вакуум насоса, мм рт. ст.	Кінематична в'язкість, 10 <sup>-6</sup> , м <sup>2</sup> /с
ВМ-1	0,87	4·10 <sup>-8</sup> ...2·10 <sup>-9</sup>	2·10 <sup>-6</sup>	65...69
ВМ-2	0,87	4·10 <sup>-8</sup> ...2·10 <sup>-9</sup>	3,5·10 <sup>-6</sup>	65...69
ВМ-5	0,87	10 <sup>-8</sup> ...10 <sup>-9</sup>	1·10 <sup>-8</sup>	68...74
ВМ-7	–	3·10 <sup>-8</sup>	1·10 <sup>-6</sup>	80...95
ОФ	0,97	1·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-8</sup>	
ОС	0,91	2·10 <sup>-8</sup>	1·10 <sup>-6</sup>	8,5
5ФЧЕ	1,2	1·10 <sup>-10</sup>	1·10 <sup>-9</sup>	130
ПЕС-В-1	0,97	5·10 <sup>-8</sup>	2·10 <sup>-6</sup>	16...33
ПЕМ-В-2	0,97	1·10 <sup>-7</sup>	3·10 <sup>-6</sup>	16...33
ПФМС-2	1,07	1·10 <sup>-8</sup>	2·10 <sup>-6</sup>	8...13
ФМ-1	1,09	1·10 <sup>-10</sup>	1·10 <sup>-8</sup>	35...37

Складні ефіри легко окисляються, але мають однофракційний склад. Ефірна рідина 5ФЧЕ може застосовуватися для одержання високого вакууму без пасток виморожування, але потребує підвищеної потужності нагрівача. Силіконові масла мають високу термостабільність. У нагрітому стані припускають багаторазовий контакт з атмосферою без зміни властивостей.

## 2.1.5 Відкачування газу

### 2.1.5.1 Безмасляне відкачування

Під безмасляним відкачуванням розуміють відкачування за допомогою засобів, що не мають органічних робочих рідин. До безмасляних відносяться насоси поверхневої дії, а також деякі насоси об'ємної дії: поршневі насоси з ртутним поршнем, водоструминні, пароводяний і парортутні ежекторні насоси, дифузійні насоси, що мають безмасляні засоби попереднього розрідження. Практично безмасляними можна назвати: турбомолекулярні

насоси, дифузійні паромасляні насоси, із багатоярусними, оптично непрозорими пастками з прогрівом.

*Турбомолекулярні насоси.* Турбомолекулярні насоси мають такі переваги:

- сталість швидкості відкачування у всьому діапазоні робочих тисків;
- можливість одержання високого і надвисокого вакууму без застосування пасток;
- забезпечення практично безмасляного відкачування;
- малий час запуску;
- тривалий інерційний період обертання ротора після відключення;
- вибірність дії відкачування для різних газів;
- порівняно великий час відновлення початкового тиску при короткочасному збільшенні газового навантаження, потрібен газовий баласт.

*Адсорбційні насоси.* Це насоси поверхневої дії. Їх використовують як засіб для створення попереднього розрідження  $1,33 \dots 10^{-2}$  Па у вакуумних системах безмасляного відкачування. Вони можуть працювати і як самостійні засоби безмасляного відкачування замкнутих об'ємів з малими потоками газівідокремлення до високого або надвисокого вакууму. Для одержання високого і надвисокого вакууму за допомогою адсорбційних насосів необхідне періодичне прокачування газу, що не адсорбується допоміжними насосами об'ємної дії.

*Переваги* адсорбційних насосів полягають у:

- простоті конструкції;
- відсутності електроживлення;
- забезпеченні безмасляного відкачування в широкому інтервалі тисків.

*Недоліки:*

- обмежена сорбційна ємність;
- залежність тиску над насосом від кількості поглиненого газу;
- мала сорбційна ємність для водню;
- необхідність безупинного заливання холодагента в систему охолодження насоса;
- необхідність у частій регенерації.

Група *електрофізичних насосів* забезпечує на 100 % безмасляне відкачування, дозволяє одержувати надвисокий вакуум. Це головні їх переваги.

До недоліків варто віднести:

- малу швидкодію (за винятком кріогенних і гетероіонних насосів), що обмежує їхнє застосування;
- велику витрату електроенергії;
- вибірність за швидкістю відкачування для різних газів (особливо для інертних).



### 2.1.5.2 Швидкість відкачування

*Швидкістю відкачування* називається кількість газів, що видаляються в одиницю часу насосом з простору, що відкачується при даному тиску, і визначається співвідношенням:

$$S = -(dV/dt),$$

де  $S$  – швидкість відкачування;

$V$  – об'єм газу, відкачаний за час  $t$ .

За законом Бойля–Маріотта маємо:

$$p = (p - dp) \cdot (V + dV),$$

де  $p$ ,  $V$  – відповідно початковий тиск і об'єм газу.

Звідки маємо  $(dp/dt) = -S (p/V)$ .

Якщо відомий кінцевий тиск  $p_\infty$ , то  $(dp/dt) = (S/V)(p - p_\infty)$ . При інтегруванні одержимо  $\ln(p - p_\infty) = C - (S/V) \cdot t$ . Нехай для моменту  $t = 0$  тиск  $p = p_0$ , тоді  $\ln(p - p_\infty) = C + \ln((p - p_\infty)/(p_0 - p_\infty)) = -(S/V) \cdot t$ , звідки

$$p - p_\infty = p_0 - p_\infty e^{-(S/V)t}.$$

Проте якщо  $p_\infty \ll p_0$ , тоді час відкачування за умови, що швидкість відкачування залежить від  $p$  (при відомих  $p$ ,  $p_0$ ,  $p_\infty$ ,  $S$  і  $V$ ), складе:

$$t = (S/V) \cdot \ln((p' - p_\infty)/(p'' - p_\infty)).$$

Середня швидкість відкачування в інтервалі часу  $t' \div t''$  складе:

$$S_{[t', t'']} = (V / (t' - t'')) \cdot (\ln(p' - p_\infty) / (p'' - p_\infty)).$$

Якщо  $p_\infty \ll p'$ ,  $p''$ , маємо:

$$S_{[t', t'']} = (V / (t' - t'')) \cdot (\ln(p'/p'')) = 2,3 (V / (t' - t'')) \lg(p'/p'').$$

Миттєва швидкість відкачування при даному тиску  $p$  визначається виразом:

$$S_p = S \cdot (1 - p_\infty/p).$$

У початковий момент  $p \gg p_\infty$  і  $S_p \approx S$ , а при  $p = p_\infty$   $S_p = 0$ .

Час відкачування від тиску  $p'$  до  $p''$  дорівнює:

$$t = t'' - t' = 2,3 (V/S_{[t', t'']}) \lg(p'/p'').$$

Якщо використати співвідношення  $\lg(p'/p'') = k$ , одержимо:

$$t = (2,3 V \cdot k) / S_{[r, t'']}$$

Швидкість відкачування через отвір, що веде в ідеальний вакуум без врахування його газодинамічного опору визначається виразом:

$$S_A = 3,65 \cdot (T \cdot A / M_0)^{1/2}$$

Якщо для повітря  $T = 293 \text{ K}$ ,  $M_0 = 29$  і  $A = 1 \text{ см}^2$ , то швидкість відкачування становить  $S = 11,7 \text{ л/с}$ . Для в'язкісного та молекулярного режимів швидкість відкачування відповідно визначається таким чином:

$$S_B \approx 200 \cdot \pi \cdot r^2 \text{ [м}^3/\text{с]} \quad S_M \approx 116 A \text{ [м}^3/\text{с]}, \quad S_{M'} = 91 d^3 \text{ [м}^3/\text{с]},$$

де  $A$  – площа отвору  $[\text{м}^2]$ ;

$d$  – діаметр отвору  $[\text{м}]$ .

Одночасно можна сказати, що  $S = U_{\text{отв}}$  (провідність отвору).

Якщо  $A = \pi \cdot R^2 \text{ [см}^2\text{]}$ , то після переведення радіусу  $R$  в  $[\text{мм}^2]$ , одержимо:

$$S = U_{\text{отв}} = (W_{\text{отв}})^{-1} \approx 11,7 \cdot 0,01 \cdot \pi \cdot R^2 \text{ [л/с]}.$$

Це провідність одиничної діафрагми з круглим отвором.

Провідність діафрагми з круглим отвором для різних режимів течії газу буде різною.

Для в'язкісного режиму газу провідність отвору визначається:

$$S_B \approx 200 \pi \cdot R^2, \text{ [м}^3/\text{с]}.$$

## 2.1.6 Вимір газових потоків

Потік газу при  $T = \text{const}$  в умовних одиницях визначається виразом:

$$Q = d(pV)/dt = p(d/dt) \div V(dp/dt).$$

Для виміру значення газового потоку може бути використаний метод постійного тиску.

Якщо  $V = \text{const}$ , то

$$Q = V(dp/dt) \approx V(\Delta p/\Delta t).$$

При цьому тиск газу, що надходить або виходить з об'єму  $V$  за час  $\Delta t$  змінюється на  $\Delta p$ . Якщо виміряти  $\Delta p$  і  $\Delta t$  при відомому об'ємі  $V$  знайдемо розмір газового потоку  $Q$ .

При  $p = \text{const}$  маємо:

$$Q = p \cdot (dV/dt).$$

У цьому випадку газ входить і виходить при постійному тиску й об'ємі, що змінюється. Якщо відомі  $\Delta V$  і  $\Delta t$ , то знайдемо потік газу:

$$Q = p \cdot (dV/dt).$$

### **Вміст звіту**

1. Стислі теоретичні положення, що характеризують вакуум як середовище, відомості про характер течії газових потоків при різних тисках.
2. Основні параметри найбільш ефективних робочих рідин для обертальних насосів попереднього розрідження.
3. Схематичний склад пластинчасто-роторного насоса.
4. Схему будови дифузійного паромасляного триступінчастого насоса.
5. Параметри робочих рідин, що найбільш широко використовуються у дифузійних насосах.
6. Стислі висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Як працює механічний обертальний насос 2НВР-5ДМ?
2. Які вимоги висуваються до форвакуумних масел?
3. Як працює дифузійний паромасляний насос?
4. Які робочі рідини використовуються в дифузійних насосах, їх характеристики?
5. Як залежить провідність елементів вакуумного каналу від режиму течії газу?
6. Охарактеризуйте режими течії газу по трубопроводі.
7. Як визначити наявність течії в камері?
8. Основні співвідношення, що характеризують швидкість відкачування.
9. Чим регламентована певна послідовність вмикання вакуумної установки?

## ВИВЧЕННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ

### Мета роботи

Ознайомитись і вивчити основні технічні характеристики електронно-променевої установки ЕЛТУ-60.15/1.1 для однопрохідного зварювання у вакуумі за лінійною та кільцевою траєкторіями металів та сплавів товщиною до 30 мм.

Дослідити основні характеристики електронного фокусування та параметри вакуумної системи.

### Прилади та обладнання

Вакуумна установка.

Система стабілізації та керування тиском.

Прикладне програмне забезпечення керування електронним променем.

### 3.1 Призначення установки для електронно-променевого зварювання

Електронно-променева зварювальна установка ЕЛТУ-60.15/1.1 (рис. 3.1) призначена для однопрохідного зварювання у вакуумі по лінійній і кільцевій траєкторії різних за твердістю і хімічною активністю металів і сплавів товщиною до 30 мм за рахунок перетворення високої кінетичної енергії прискорених електронів в теплову енергію при їх зіткненні з металом.

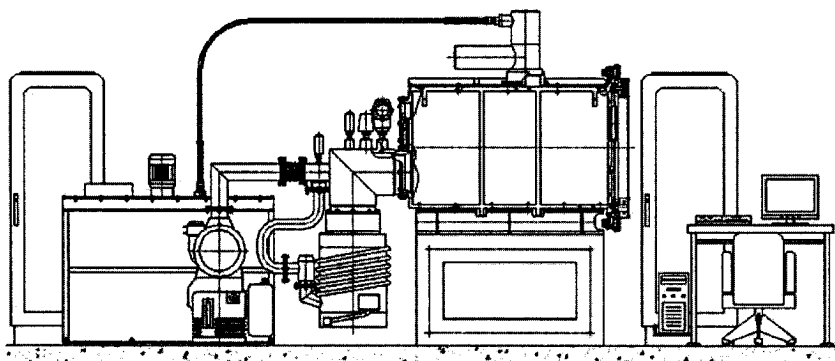


Рисунок 3.1 – Схема електронно-променевої зварювальної установки ЕЛТУ-60.15/1.1

## **3.2 Основні технічні дані установки для електронно-променевого зварювання**

Використання технології електронно-променевого зварювання забезпечує, в порівнянні з традиційними технологіями, високу продуктивність процесу та отримання нероз'ємних з'єднань вищої якості. Завдяки високій густині енергії, що вводиться в метал, тепловкладення при утворенні з'єднання складає до 10 % від тепловкладення при дуговому зварюванні. Як наслідок, ширина шва і зона термічної дії стають меншими у декілька разів. Мінімальні деформації і високі фізико-механічні характеристики зварних з'єднань, одержаних зварюванням електронним променем, як правило, дозволяють виключити подальшу механічну і термічну обробку зварюваного виробу.

Управління процесом зварювання, як і всіма параметрами комплексу, здійснюється в автоматичному або ручному режимах за допомогою комп'ютера індустріального типу.

### **3.3 Склад установки ЕЛТУ-60.15/1.1**

До складу електронно-променевої зварювальної установки входять:

1. Електронно-променева апаратура ЕЛТА-60.
2. Шафа силова.
3. Стояк керування.
4. Пульти керування.
5. Пристрій технологічної розгортки електронного пучка.
6. Системи формування початку і закінчення зварювального процесу.
7. Додаткові пристрої і системи електронно-променевої апаратури ЕЛТА-60:
  - пристрій низькочастотної технологічної розгортки;
  - система фіксованого відхилення електронного пучка;
  - пристрій відеоконтролю;
  - система реєстрації і документування параметрів процесу зварювання;
  - відеосистема;
  - принтер;
  - робоче місце оператора;
  - турбомолекулярний насос для диференціального відкачування анодно-катодної області гармати.

#### **3.3.1 Електронно-променева апаратура ЕЛТА-60**

##### **Призначення та будова апаратури**

Електронно-променева технологічна апаратура ЕЛТА-60 має три модифікації ЕЛТА-60.6, ЕЛТА-60.15 і ЕЛТА-60.40 з максимальною вихідною потужністю електронного пучка 6 *кВт*, 15 *кВт* і 40 *кВт*, відповідно

і призначена для однопрохідного зварювання у вакуумі енергією прискорених електронів, сфокусованих в гострий пучок.

Конструктивно електронно-променева апаратура ЕЛТА-60 може бути розділена на базову частину, на вузли і системи. Основні технічні характеристики установки ЕЛТУ-60.15/1.1 наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики електронно-променевої установки ЕЛТУ-60.15/1.1

Технічні характеристики установки ЕЛТУ-60.15/1.1	
назва характеристики	значення
Максимальна потужність електронного пучка, <i>кВт</i>	15
Прискорювальна напруга, <i>кВ</i>	60
Діапазон зміни струму електронного пучка, <i>мА</i>	1...250
Діапазон зміни струму фокусування, <i>мА</i>	400...1000
Діапазон зміни струму бомбардування, <i>мА</i>	10...60
Робоча відстань між гарматою і деталлю, <i>мм</i>	80...250
Переміщення столу здійснюється на відстань, <i>мм</i> :	
– по осі X	500
– по осі Y	400
Діапазон швидкостей переміщення по осях X і Y, <i>мм/с</i>	0,2...15
Точність позиціонування, <i>м</i>	≥ +0,05
Максимальна вага деталі, що встановлюється на стіл переміщення, <i>кг</i>	≤ 100
Максимальний діаметр деталі обертання, що встановлюється на обертач, <i>мм</i>	≤ 300
Діапазон швидкостей обертання, <i>об/хв</i>	0,1...10
Вага деталі, що встановлюється на обертач, <i>кг</i>	≤ 50
Час отримання робочого вакууму в камері, <i>хв</i>	≤ 20
Максимальна потужність, споживана комплексом, <i>кВт</i>	≤ 25
Маса технологічного комплексу, <i>кг</i>	≤ 4000

Особливості установки ЕЛТУ-60.15/1.1:

- вакуумна система управляється автоматизовано;
- електронно-променево зварювання в ручному і в автоматичному режимі за заданою технологічною програмою;
- виведення на екран монітора поверхні зварюваного виробу і точне наведення електронного пучка на необхідну точку поверхні виробу в режимі малих струмів;

- діагностика функціонування основних компонентів комплексу;
- технологічна розгортка електронного пучка по колу, еліпсу, лінії.

З метою монтажу установки ЕЛТУ-60.15/1.1 необхідно забезпечити основні експлуатаційні вимоги (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Основні експлуатаційні вимоги

Технічні характеристики установки ЕЛТУ-60.15/1.1	
назва характеристики	значення
Мережа електроживлення: трифазна з нейтраллю, <i>V</i>	220/380 ± 10 %, 50 Гц
Здатність навантаження мережі електроживлення, <i>кВА</i> :	
– ЕЛТА-60.6	≥ 15
– ЕЛТА-60.15	≥ 25
– ЕЛТА-60.40	≥ 55
Заземлення:	
– опір, <i>Ом</i>	≤ 3
– переріз дроту, <i>мм<sup>2</sup></i>	≥ 35
Температура робочого приміщення, °С	15...35
Відносна вологість в робочому приміщенні, %	≤ 80
Температура навколишнього середовища при зберіганні і транспортуванні, °С	-25...+50
Вакуум в катодно-анодній області, Торр	≤ 5×10 <sup>-5</sup>
Магістраль води для охолодження:	
– тиск, <i>кГс/см<sup>2</sup></i>	≤ 2...3
– температура, °С	≤ 25
– витрата води, <i>л/хв.</i>	≤ 20
Підйомний пристрій – здатність навантаження, <i>кг</i>	≥ 2000

Основні існуючі модифікації технологічного обладнання визначаються їхнім призначенням (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Основні модифікації технологічної установки ЕЛТА-60 в залежності від призначення

Призначення технологічного обладнання	ЕЛТА-60.6	ЕЛТА-60.15	ЕЛТА-60.40
Для сталей, товщиною до, <i>мм</i>	25	45	65
Для титану і його сплавів, товщиною до, <i>мм</i>	30	55	70
Для алюмінію і його сплавів, товщиною до, <i>мм</i>	35	60	80

## Базова частина електронно-променевої апаратури ЕЛТА-60

До складу базової частини ЕЛТА-60 (рис. 3.2) входять:

- електронно-променева гармата;
- високовольтне джерело живлення;
- силова шафа;
- стоек керування;
- пульт керування.

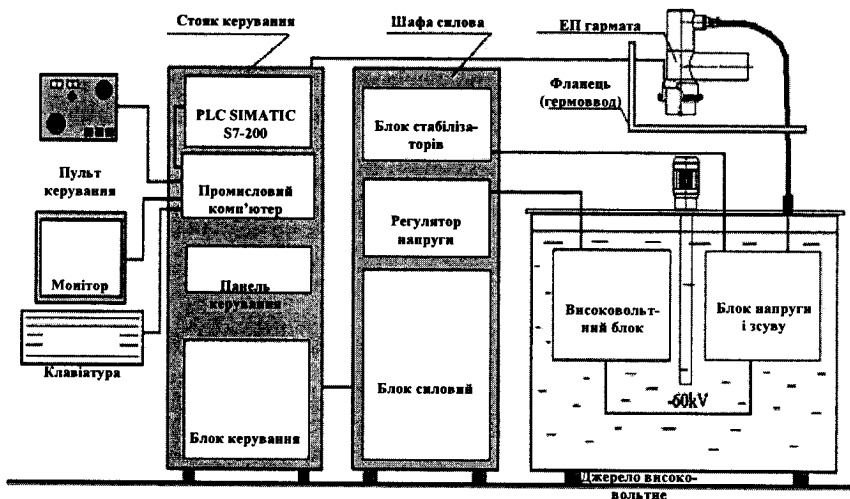


Рисунок 3.2 – Склад і функціональна будова ЕЛТА-60

*Електронно-променева гармата* (рис. 3.3) може встановлюватися як зовні робочої вакуумної камери, так і усередині неї в будь-якому просторовому положенні. Вага і габаритні розміри електронно-променевої гармати дозволяють встановлювати її усередині робочої вакуумної камери на маніпуляторі із здатністю навантаження, не менше 70 кг.

- катод з непрямим підігрівом, виконаний з монокристала  $\text{LaB}_6$ , емітує потік електронів, що формується далі в аксіально-симетричний електронний пучок;
- прикатодний керуючий електрод (електрод Венельта) забезпечує формування заданого значення струму електронного пучка з необхідною стабільністю і пульсаціями;
- анод, що має корпусний потенціал, забезпечує прискорення електронів (до катода прикладена напруга – 60 кВ) до необхідної швидкості у напрямі оброблюваної поверхні.



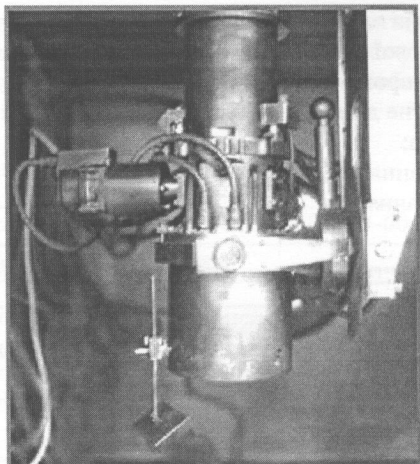


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд електронно-променевої гармати

Для отримання гостросфокусованого електронного пучка, служить *фокусуюча лінза*.

Для відхилення електронного пучка на кут до 7 градусів від осі гармати застосована електромагнітна відхильна система. У разі, коли електронно-променева гармата встановлюється усередині вакуумної камери, для підведення до гармати всіх необхідних комунікацій використовується *прохідний фланець (гермоввод)*. На фланці встановлені всі необхідні прохідні роз'єми, штуцери, що забезпечують введення/виведення води для охолодження гармати і турбомолекулярного насоса, а також на фланці є спеціальний отвір для введення в камеру високовольтного кабелю гармати. Цей фланець встановлюється в зручному місці на вакуумній камері.

*Високовольтне джерело живлення* (рис. 3.4) функціонально складається з:

- джерела прискорювальної напруги;
- джерела напруги і зсуву.

Як джерело прискорювальної напруги в апаратурі ЕЛТА-60 застосований високовольтний блок з високочастотним перетворювачем, побудованим із застосуванням сучасних могутніх напівпровідникових елементів IGBT технології. Високовольтний блок має розміри 450×270×340 (мм) – для ЕЛТА-60.6 і ЕЛТА-60.15 і 450×410×340 (мм) – для ЕЛТА-60.40.

Конструкція і схемотехнічне рішення, закладені в джерелі прискорювальної напруги, дозволяють здійснювати плавний вихід на робочий режим прискорювальної напруги при його включенні і приглушення електричних розрядів в електронно-променевій гарматі у разі їх виникнення.

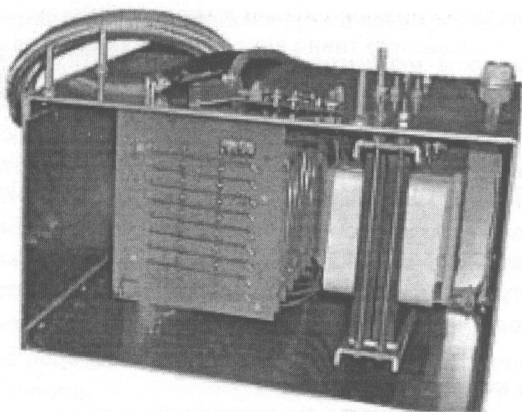


Рисунок 3.4 – Високовольтне джерело живлення

Основні характеристики джерела живлення:

- час виходу на робочий режим прискорювальної напруги при включенні  $0,2...2$  с;
- час, протягом якого прискорювальна напруга відключена в результаті виникнення розряду в електронно-променевої гарматі  $2... 100$  мс;
- час виходу на робочий режим прискорювальної напруги після переривання в результаті виникнення розряду в електронно-променевої гарматі  $5...125$  мс;
- пульсації прискорювальної напруги,  $\leq 100$  В;
- зміна прискорювальної напруги при зміні навантаження в межах  $0...100$  %,  $\leq 100$  В;
- коефіцієнт корисної дії джерела при повному навантаженні,  $\geq 90$  %.

Оптимальні значення вказаного часу встановлюються оператором.

Основою джерела напруги і зсуву є блок напруги і зсуву, що забезпечує регулювання струму електронного пучка і живлення катода електронно-променевої гармати.

Конструктивно високовольтний блок і блок напруги і зсуву поміщені в бак з трансформаторним маслом, яке виконує як роль високовольтного ізолятора, так і охолоджувача. У свою чергу, відведення тепла трансформаторного масла здійснюється водяною системою охолодження. За допомогою спеціального насоса забезпечується циркуляція трансформаторного масла усередині бака.

### 3.3.2 Шафа силова

Шафа силова (див. рис. 3.2) виконана в стандартному 19" стояку, усередині якого, встановлюються:

- регулятор напруги;
- блок стабілізаторів;
- силовий блок.

*Регулятор напруги* працює спільно з високовольтним блоком високовольтного джерела. Конструктивно він є блоком, який вставляється в стояк з профілем 19". Цей блок здійснює контроль і стабілізацію прискорювальної напруги.

*Блок стабілізаторів* конструктивно є набором друкарських пластин, джерел живлення і пристроїв автоматики, що забезпечують стабілізацію струму зварювання, струму бомбардування, індикацію зсуву.

*Словий блок* є набором комутаційних пристроїв, що забезпечують підключення апаратури до мережі живлення і автоматику включення і відключення апаратури. Силова шафа встановлюється на відстані, не більше 1 м від високовольтного джерела.

### **3.3.3 Стояк керування**

Конструктивно стояк керування виконаний з монтажним профілем 19". У стояку розміщені такі блоки:

- системний блок промислового комп'ютера (індустріальне виконання) з набором модулів введення/виведення;
- панель керування;
- мікроконтролер Simatic S7-200 (на базі CPU 224);
- вторинні джерела живлення;
- блок керування.

Широкофункціональний і високонадійний програмований логічний контролер SIMATIC S7-200 фірми SIEMENS забезпечує контроль і аналіз сигналів зворотних зв'язків, а також організацію всієї автоматики в роботі апаратури:

- включення/відключення мережі живлення;
- аварійне відключення прискорювальної напруги і катода гармати;
- включення/відключення режиму тренування гармати;
- регулятор зміни прискорювальної напруги в режимі тренування гармати;
- стрілковий індикатор прискорювальної напруги.

### **3.3.4 Пульт керування**

У апаратурі передбачений пульт керування, який може розташовуватися на відстані до 5 м від стояка керування.

На панелі пульта керування розташовані такі органи керування і індикації:

- включення/відключення прискорювальної напруги;
- включення/відключення живлення катода гармати;
- регулятор струму бомбардування;
- аварійне відключення прискорювальної напруги і катода гармати;
- регулятор струму зварювання;
- регулятор струму фокусування.

### 3.3.5 Пристрій технологічної розгортки електронного пучка

Пристрій (генератор) технологічної розгортки виробляє сигнали, що дозволяють здійснювати технологічну розгортку електронного пучка по колу.

Частота генератора регулюється ступінчасто, забезпечуючи набір частот технологічної розгортки: 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 і 1200 Гц.

Максимальний кут відхилення електронного пучка від осі електронно-променевої гармати складає 3 град.

Установлення розміру технологічної розгортки електронного пучка здійснюється за допомогою керуючої програми, в діапазоні від 0 до 999 з дискретністю одиниць.

Таблиця 3.5 надає можливість порівняння основних технічних характеристик апаратури ЕЛТА-60.

Таблиця 3.5 – Основні технічні характеристики апаратури ЕЛТА-60.

Назва технічної характеристики	ЕЛТА-60.6	ЕЛТА-60.15	ЕЛТА-60.40
Максимальна потужність електронного пучка, <i>кВт</i>	6	15	40
Прискорювальна напруга, <i>кВ</i>	60	60	60
Діапазон зміни струму електронного пучка, <i>мА</i>	1...100	1...250	1...650
Нестабільність прискорювальної напруги $\leq$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$
Нестабільність струму зварювання $\leq$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$
Діапазон зміни струму фокусування, <i>мА</i>	400...999	400...999	400...999
Діапазон зміни струму бомбардування, <i>мА</i>	10...50	10...50	10...50
Робоча відстань між гарматою і деталлю (для процесу зварювання), <i>мм</i>	50...500 (50...250)	50...500 (50...250)	50...500 (50...250)
Довжина високовольтного кабелю до, <i>м</i>	15	15	15
Максимальна потужність споживання апаратури $\leq$ , <i>кВА</i>	10	20	50
Вага апаратури $\leq$ , <i>кг</i>	1000	1000	1000

### 3.3.6 Системи формування початку і закінчення зварювального процесу

Система дозволяє здійснювати керування струмом зварювання на початку зварювального процесу і керування струмом зварювання і струмом фокусування при його закінченні.

Струм зварювання на початку зварювального процесу (перехід з режиму СТОП в режим ЗВАРЮВАННЯ) зростає до встановленого значення за лінійним законом за встановлений час. Тривалість початку зварювального процесу може бути встановлена від 0 до 10 с з дискретністю 1 с.

При закінченні зварювального процесу (перехід з режиму ЗВАРЮВАННЯ в режим СТОП) за заданими програмами за встановлений час змінюється струм зварювання і струм фокусування. Програма розбита на 20 тимчасових інтервалів, на кожному з яких струм зварювання може приймати значення 0...1,2 *крат* встановленої величини струму зварювання, а струм фокусування – 0,9...1,1 *крат* встановленої величини струму фокусування. Тривалість закінчення зварювального процесу може бути встановлена в діапазоні 2...140 с з дискретністю одна секунда.

### 3.3.7 Додаткові пристрої і системи електронно-променевої апаратури ЕЛТА-60

Базова частина електронно-променевої технологічної апаратури ЕЛТА-60 доукомплектується одним або декількома пристроями і системами, що розширюють її специфічні можливості. Отже, вибір необхідних пристроїв і систем дозволяє одержати електронно-променеву технологічну апаратуру ЕЛТА-60 максимально адаптовану для вирішення вартісних завдань при мінімальних витратах. До додаткових пристроїв і систем відносяться:

- пристрій низькочастотної технологічної розгортки;
- система фіксованого відхилення електронного пучка;
- пристрій відеоконтролю;
- система реєстрації і документування основних параметрів процесу зварювання;
- відеосистема;
- робоче місце оператора;
- турбомолекулярний насос для диференціального відкачування анодно-катодної області гармати;
- пристрій відеоконтролю (ПВК) SeoTECH VIDEO;
- вакуумна камера;
- вакуумна система;
- маніпулятор.

*Пристрій низькочастотної технологічної розгортки* забезпечує низькочастотну технологічну розгортку електронного променя по колу подачею струмів синусоїдальної і косинусоїдальної форми на відхильні котушки X–X і Y–Y електронно-променевої гармати.

При включеній високочастотній розгортці забезпечується накладення розгорток і регулювання параметрів кожної з розгорток. Технологічні параметри низькочастотної розгортки, що включають параметри формування зварного шва, наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Параметри низькочастотної розгортки, включаючи параметри формування шва:

Параметри розгортки	Значення
Діапазон зміни частоти, Гц	0,01...1
Дискретність установалення частоти, Гц	0,01
Кут перекриття зварювання, град.	0...180
Кут наростання/спаду струму зварювання, град.	0...90
Діапазон зміни амплітуди (діаметра) розгортки при відстані від нижнього краю гармати до виробу 200 мм:	0...30
Дискретність установалення амплітуди розгортки, мм	0,03

Система фіксованого відхилення електронного пучка дозволяє відхилити електронний пучок на необхідний фіксований кут від осі електронно-променевої гармати в будь-якому напрямі. Здійснюється це подачею фіксованих струмів на відхильні котушки X-X і Y-Y електронно-променевої гармати.

#### Основні характеристики системи відхилення електронного пучка

1. Максимальний кут відхилення від осі гармати, не більше 7 град.
2. Діапазон зміни струмів відхилення в котушках X-X і Y-Y  $\pm 600$  мА.
3. Нестабільність струмів відхилення на величині  $+ 600$  мА  $\pm 0,5\%$ .

Установалення величини фіксованого відхилення електронного пучка здійснюється зміною величини струмів в котушках відхилення X-X і Y-Y  $- 600... + 600$  мА з дискретністю 1 мА.

Пристрій відеоконтролю дозволяє здійснювати спостереження поверхні зварюваного виробу і забезпечує точне наведення електронного пучка на кромки стику зварюваного виробу. Виведення зображення здійснюється на екран монітора ПЕОМ (рис. 3.4). Точне наведення на кромки стику забезпечується за рахунок виведення маркера у формі перехрестя на зображення поверхні зварюваного виробу.

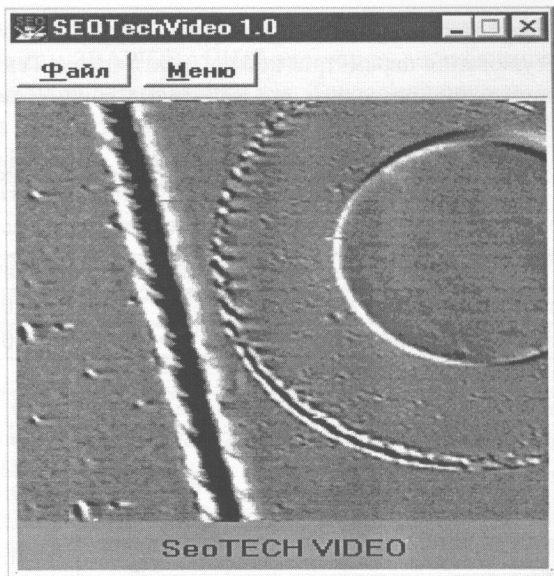


Рисунок 3.4 – Інтерфейс відеоконтролера

Основні характеристики пристрою відеоконтролю:

- розмір зображення 256×256 пікселів;
- розмір спостережуваної ділянки виробу, при відстані від нижнього краю електронно-променевої гармати до виробу 100 мм, не менше 20×20 мм;
- формат збереження зображення jpg, bmp;
- швидкість виведення зображення на екран монітора:
  - при повільній розгортці 2 кадр/с;
  - при швидкій розгортці 4 кадр/с.

Поточне зображення може бути збережено і при необхідності виведено на екран монітора в інтерфейсі програми.

Оптимальне за чіткістю і різкістю зображення може бути одержано як за допомогою регулювань, що знаходяться в меню програми, так і установленням максимально допустимого значення струму електронного пучка в режимі вакуумно-конденсаційного устаткування в межах 0,5...1,5 мА і, відповідно, регулюванням струму фокусуєної лінзи електронно-променевої гармати.

*Система реєстрації і документування основних параметрів процесу зварювання здійснює запам'ятовування:*

- струму зварювання, який реально відповідає технологічному процесу;
- струму фокусування;

- напруги на катоді Венельта;
- струму бомбардування;
- прискорювальної напруги в процесі зварювання.

У окремому вікні інтерфейсу керуючої програми забезпечується побудова тимчасових залежностей значень струмів і напруг, заданих на початку зварювання і реально одержаних під час зварювання. Залежності можуть бути збережені на диск і при необхідності виведені на екран монітора в інтерфейсі програми.

*Відеосистема* забезпечує:

- візуалізацію на екрані додаткового монітора зони ДЕТАЛЬ – ГАРМАТА робочого об'єму (вакуумної камери);
- спостереження в процесі зварювання за формуванням зварювального шва;
- виключення необхідності використання оператором оглядових вікон в робочій камері в період всього зварювального процесу.

До складу відеосистеми входять:

- CCD відеокамера SPT-M320CE (Sony) або аналогічна;
- монітор SSM-930CE (Sony) або аналогічний.

*Принтер* призначається для виведення на друк (документування) необхідної інформації, а саме:

- одержаного зображення при використанні ПК;
- тимчасових графіків, одержаних при використанні системи моніторингу і документування процесу зварювання.

Принтер струменевий кольоровий HP3745 (Hewlett Packard) або аналогічний.

*Робоче місце оператора* включає:

- стіл для розміщення монітора промислового комп'ютера, монітора відеосистеми і пульта керування;
- стілець.

*Турбомолекулярний насос для диференціального відкачування анодно-катодної області гармати.* Використання турбомолекулярного насоса продуктивністю не менше 140 л/с для диференціального відкачування анодно-катодної області гармати забезпечує отримання в цій області тиску не більше  $5 \times 10^{-5}$  Торр (мм. рт. ст.) при робочому тиску у вакуумній камері, не більше  $6 \times 10^{-4}$  Торр.

У комплект входить вакуумний клапан турбомолекулярного насоса. Спільно з вакуумним клапаном гармати вакуумний клапан турбомолекулярного насоса забезпечує збереження форвакууму в анодно-катодній області гармати в неробочому стані зварювальної установки протягом тривалого



часу. В результаті значно продовжується термін служби катода і підігрівача електронно-променевої гармати.

*Пристрій відеоконтролю (ПВК) SeoTECH VIDEO* (рис. 3.5) призначений для формування цифрового зображення поверхонь виробів, оброблюваних електронним пучком.

Одержане зображення виводиться на екран монітора комп'ютера і дозволяє забезпечити точне наведення електронного пучка в необхідну точку поверхні оброблюваного виробу.

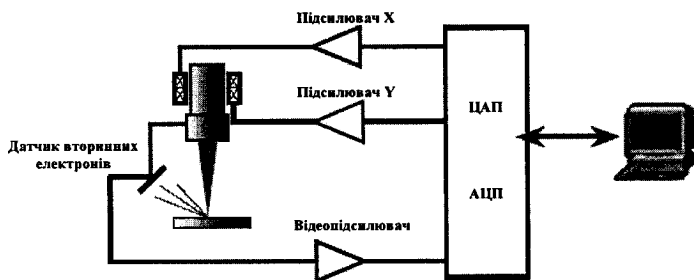


Рисунок 3.5 – Склад і функціональна побудова Seotech VIDEO

При використанні ПВК:

- не потрібне оброблення стику;
- забезпечується точність наведення електронного пучка в задану точку не менше  $\pm 0,05$  мм;
- забезпечується швидкість виведення зображення, що достатня для точного наведення і виключає появу сліду на поверхні виробу;
- надається можливість запам'ятовування одержуваного зображення, а також виведення заздалегідь збереженого зображення на екран монітора і на принтер.

Пристрій відеоконтролю може бути використаний в апаратурі типу ЕПА-60Б, ЕПА-60БВ, ЕПА-60В.

Робота ПВК основана на прийомі і декодуванні сигналу, що одержується з датчика вторинних електронів при роботі електронно-променевої апаратури в режимі малих струмів (0,5...1,0 мА).

При скануванні поверхні деталі сфокусованим електронним пучком за допомогою відхильної системи відбувається вибивання вторинних електронів з поверхні деталі. Потік вторинних електронів уловлюється металевою пластиною. Інтенсивність цього потоку залежить від величини струму електронного пучка і рельєфу сканованої поверхні. Сигнал, одержаний з датчика вторинних електронів і посилений відеопідсилювачем, оцифровується в кожній

точці растра. Набуте значення струму вторинних електронів зберігається у вигляді масиву значень в пам'яті комп'ютера. Потім, при виведенні зображення на екран монітора, масив значень зчитується і відображається у вигляді набору пікселів різної яскравості, прямо пропорційної інтенсивності потоку вторинних електронів. Основні експлуатаційні вимоги до ПЕОМ наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Склад, експлуатаційні вимоги та мінімальна конфігурація ПЕОМ відеоконтролю Seotech-VIDEO

Складові пристрою відеоконтролю	Примітка
Комп'ютер, шт.	1
Модуль введення/виведення (PCI слот), шт.	1
Відеопідсилувач (PCI слот), шт	1
Підсилувачі розгортки (PCI слот), шт.	1
CD з програмним забезпеченням, шт.	1
Комплект приєднувальних кабелів, шт.	1
Мінімальний струм електронного пучка, <i>мА</i>	0,5
Відстань від колектора до деталі, <i>мм</i>	150
Матеріал колектора	Мідь М1
Мінімальні розміри колектора, <i>мм</i>	100×60×2
Pentium III 700 MHz; RAM 256 MB; HDD 20 GB; CD-ROM; 5 вільних PCI слотів	

Вакуумна камера зварна, безкаркасного типу, прямокутної форми із знімною кришкою (рис. 3.6). Внутрішні розміри камери 1400×1200×700 (*мм*<sup>3</sup>).

Мінімально тиск  $1,5 \times 10^{-4}$  Торр (*мм рт. ст.*) в порожній камері забезпечується за час, не більше 30 хв. Час досягнення необхідного вакууму може збільшитися, якщо відбуватиметься обробка незнегаженого матеріалу.

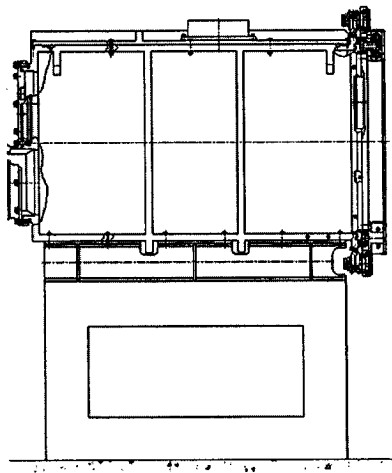
Камера виготовляється з нержавіючої сталі.

Конструкція камери забезпечує необхідну механічну міцність – деформація камери при отриманні вакууму відсутня.

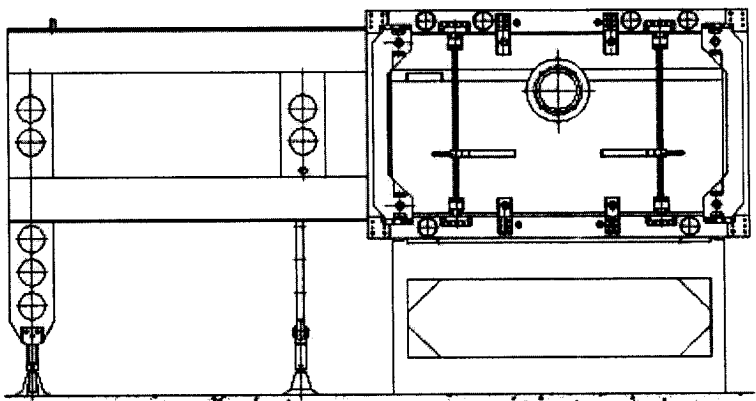
На задній стінці камери встановлені три фланці для під'єднання вакуумної системи і здійснення введення необхідних комунікацій всередину камери.

Доступ в робочий об'єм камери здійснюється через двері.

Двері відкриваються і закриваються вручну. Потрібні для цього зусилля мінімальні. На дверях встановлено оглядове вікно. Всередині оглядове вікно захищене від можливого напilenня знімним, легко замінюваним захисним склом.



а)



б)

Рисунок 3.6 – Схема вакуумної камери:  
а – вид збоку; б – вид спереду

Конструкція механізму переміщення, відкриття і закриття дверей забезпечує при закриванні надійне стикання вакуумного ущільнення дверей з площиною дверного отвору камери, а при відкриванні – надійний зазор між вакуумним ущільненням дверей і камерою.

Механізм дозволяє легко регулювати ступінь притиснення дверей до початку процесу вакуумування і встановлювати її оптимальне положення.

Вакуумна система, блок-схема якої наведена на рис. 3.7, призначена для створення і підтримки в процесі роботи необхідного вакууму в робочому об'ємі  $1,1 \text{ м}^3$ .

Вакуумна система включає:

- форвакуумний агрегат N1, що складається з пластинчасто-роторного (N1a) і двороторного (N1b) вакуумних насосів;
- дифузійний паромасляний насос N2;
- турбомолекулярний насос N3;
- вакуумні клапани V1, V2, V3, V4, V5;
- вакуумні датчики P1, P2 і P3;
- для напуску повітря в систему служить вентиль V4.

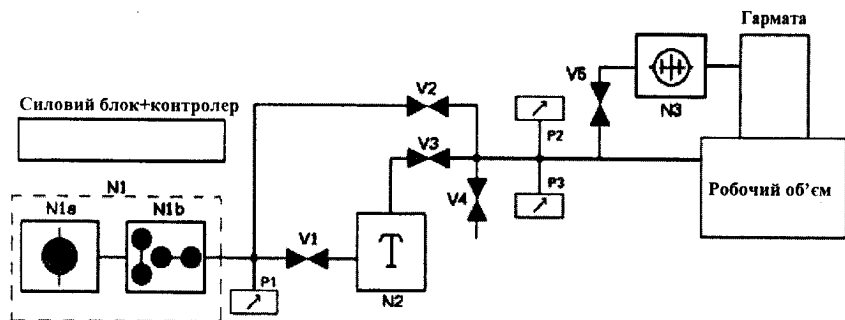


Рисунок 3.7 – Блок-схема вакуумної системи

Комутація силових кіл керування здійснюється в силовому блоці. Керування вакуумною системою здійснюється контролером (PLC) SINATIC-S7-200 за допомогою керуючого комп'ютера. Основні технічні характеристики вакуумної системи містить табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Основні технічні характеристики вакуумної системи

Назва характеристики	Значення
Одержуваний залишковий тиск в робочому об'ємі $1,1 \text{ м}^3$ , <i>Torr</i>	$5 \times 10^{-4}$
Одержуваний залишковий тиск в катодному вузлі електронно-променевої гармати, <i>Torr</i>	$5 \times 10^{-5}$
Час досягнення робочого тиску, <i>хв</i>	$\leq 30$
Час виходу дифузійного насоса на робочий режим, <i>хв</i>	$\geq 30$
Час охолодження дифузійного насоса після закінчення роботи, <i>хв</i>	$\leq 40$
Діаметр вхідного патрубку вакуумної системи, <i>мм</i>	250

*Комплектність вакуумної системи:*

1. Форвакуумний агрегат N1: E2M175/EN1200 (EDWARDS) – 1шт. Склад:
  - пластинчасто-роторний насос E2M175 – 1шт;
  - двороторний насос EN1200 – 1шт.
2. Дифузійний насос N2: НВДМ-250 (Казань) – 1шт. Склад:
  - корпус з паропроводом – 1шт.;
  - нагрівач – 1шт.
3. Турбомолекулярний насос N3: – 1шт.
4. Вакуумний клапан з електромагнітним приводом V1:  
КВМ-63 – 1шт.
5. Вакуумний клапан з електромагнітним приводом V4 і V5:  
КВМ-25 – 2шт.
6. Вакуумний затвор з електромеханічним приводом V2:  
23ВЭ-100 – 1шт.
7. Вакуумний затвор з електромеханічним приводом V3:  
23ВЭ-250 – 1шт.
8. Датчики вакууму (EDWARDS):
  - низьковакуумний датчик P1 і P2: APG-L-MW16 – 2шт;
  - високовакуумний датчик P3: AIM-X-NW25 – 1шт.
9. Силовий блок – 1шт.
10. Силові кабелі і сигнальні джгути – 1комплект.
11. Водяні шланги – 1комплект.

*Маніпулятор* (рис. 3.8) встановлюється у вакуумну камеру для лінійного переміщення і обертання оброблюваної деталі, що забезпечує:

- точність позиціонування +50 мм;
- швидкість переміщення до 20 мм/с.

Маніпулятор може бути одно- або двокоординатний.

Обертачі, які використовують для обертання деталей, за конструкцією бувають: з вертикальною або горизонтальною віссю обертання.

Система позиціонування включає:

- прецизійні лінійні столи переміщення і обертач;
- датчики переміщення;
- крокові приводи.

Прецизійні лінійні столи переміщення дозволяють встановлювати деталі вагою до 500 кг.

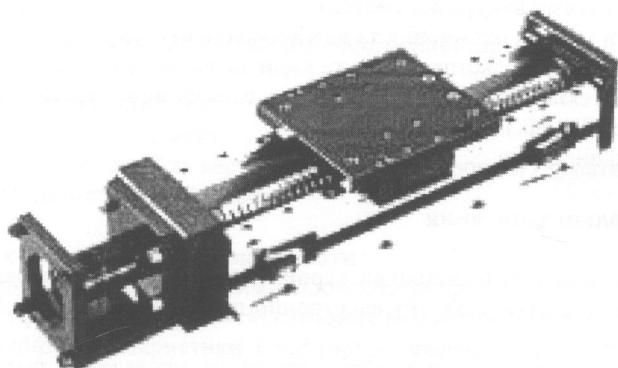
Столи мають стандартний фланець кріплення двигунів: NEMA-34. Столи обладнані датчиками переміщення і кінцевими мікровимикачами, що обмежують хід столу. Для захисту третьових частин стіл оснащений захисним металевим кожухом.

Для здійснення обертання оброблюваного виробу на маніпуляторі може бути встановлений обертач.

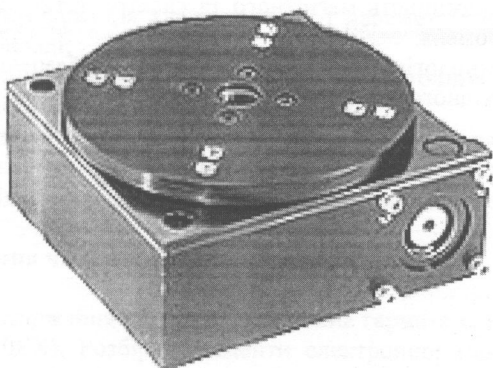
Обертач забезпечує:

- максимальну вагу встановлюваної деталі 90 кг;
- максимальну швидкість обертання 15 об/хв.

Обертач має стандартний фланець кріплення двигунів: NEMA-34. Обертач може встановлюватися як в горизонтальному, так і у вертикальному положенні.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Маніпулятори: а – лінійний; б – обертальний

Система керування установкою побудована на базі системи керування електронно-променевої технологічної апаратури ЕЛТА-60.15. Керування маніпулятором ґрунтується на застосуванні устаткування з числовим програмним керуванням, побудованим на базі спеціального модуля позиціонування індустриального комп'ютера, що входить до складу електронно-променевої технологічної апаратури ЕЛТА-60.15.

## **Зміст звіту**

1. Вивчити склад та функціональне призначення окремих підсистем технологічної установки для електронно-променевого зварювання ЕЛТА-60.15.
2. Скласти загальну структуру установки для електронно-променевого зварювання ЕЛТА-60.15.
3. Скласти схему вакуумної системи.
4. Описати методи отримання та вимірювання вакууму.
5. Описати області застосування та види зварювальних швів, що отримують на технологічній установці для електронно-променевого зварювання ЕЛТА-60.15.
6. Короткі висновки.

## **Контрольні запитання**

1. Які переваги та недоліки електронно-променевого зварювання?
2. Вкажіть шляхи розвитку електронно-променевих технологій на територіях України.
3. Як оптимізувати енергетичні витрати на проведення технологічного процесу на установці для електронно-променевого зварювання ЕЛТА-60.15?
4. Поясніть відмінність магнітного та електростатичного фокусування електронного променя.
5. Якими технологічними засобами можна забезпечити прискорене отримання необхідного вакууму?

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННОЇ ГАРМАТИ

### Мета роботи

Вивчення основних характеристик системи електронного нагрівання термоемісійного катода.

Дослідження основних параметрів електронної гармати.

### Прилади та обладнання

Термоелектронна гармата

Пристрій стабілізації та керування термоелектронної гармати

Високовольтний блок живлення

### Хід виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями про:
  - конструктивні особливості катодних вузлів з електронним нагрівом;
  - емісійні характеристики і параметри масивних металевих катодів потужних електронних гармат;
  - методи вимірювання емісійних параметрів термоемітерів;
  - методи вимірювання характеристик і параметрів електронної гармати в приладі;
  - основні співвідношення для розрахунку катодних вузлів з електронним нагріванням.
2. Ознайомитись з методикою вимірювання основних параметрів системи електронного нагрівання катодів і характеристик електронного пучка та дослідити параметри роботи електронної гармати.

### 4.1 Теоретична частина

Об'єктом дослідження служить електронна гармата електронної лампи біжучої хвилі (ЛБХ). Розбірні елементи електронної гармати подані на демонстраційному стенді.

Основні номінальні параметри досліджуваної електронної гармати і формованого пучка:

- прискорювальна напруга  $U = 20 \text{ кВ}$ ;
- струм електронного пучка  $I = 4 \text{ А}$ ;
- діаметр пучка  $1 \text{ см}$ ;
- довжина транспортування пучка в сповільнювальній структурі до колектора  $40 \text{ см}$ ;
- магнітне поле соленоїда  $0,25 \text{ Тл}$ .

Параметри катода і системи його нагрівання електронним бомбардуванням в номінальному режимі:



- основний вольфрамовий катод діаметром 1 см і товщиною 0,2 см;
- допоміжний прямонакальний вольфрамовий катод у вигляді кільцевої нитки діаметром 0,33 мм;
- струм розжарення нитки  $I_{\text{пн}} = 20 \text{ А}$  при напрузі  $U_{\text{пн}} = 7 \text{ В}$ ;
- прискорювальна напруга електронного нагріву  $U_{\text{ен}} = 1,5 \text{ кВ}$ ;
- струм електронного нагріву  $I_{\text{ен}} = 300 \text{ мА}$ .

В ЛБХ електронний промінь, який групується у пучок, взаємодіє з електромагнітним полем та віддає йому свою енергію. Але в ЛБХ тепер це поле вже не зосереджене в якомусь певному місці, воно «бжить» разом з електронним променем, оточуючи його.

Для того щоб промінь не розсіювався, використовують спеціальну фокусуючу котушку, яка створює поздовжнє магнітне поле. Довжина шляху променя не перевищує кількох десятків сантиметрів.

Електрони, які набрали швидкість та сфокусувались, потрапляють в робочу частину лампи. При цьому їх швидкість досягає приблизно однієї десятої частини швидкості світла. Робоча частина ЛБХ являє собою лінію передачі електромагнітної енергії. В центрі ЛБХ розміщено спіраль. Спеціальний пристрій з'єднує початок і кінець спіралі із зовнішніми лініями подачі та відведення електромагнітної енергії. Зазвичай ЛБХ використовується для підсилення прийнятих відбитих сигналів. Електромагнітна хвиля потрапляє в лампу і спрямовується вздовж спіралі. Дійсна швидкість розповсюдження хвилі вздовж спіралі відповідає приблизно швидкості світла. Проте головним параметром є швидкість вздовж осі спіралі (тобто, той шлях, яким рухаються електрони). Ця швидкість менша за швидкість світла в стільки разів, в скільки разів довжина одного витка спіралі більша за відстань між сусідніми витками. Відповідна конструкція спіралі може зробити цю швидкість рівною швидкості електронів у пучку.

Як тільки електронний пучок потрапляє в робочу частину лампи, він починає рухатись одночасно з хвилею та взаємодіяти з нею. Електричне поле спіралі змінює величину та напрямок. В одних місцях воно прискорює електрони, в інших гальмує. Групи електронів з підвищеною швидкістю вириваються уперед, сповільнені – відстають. У такий спосіб утворюються «пакети», які рухаються один за одним. При гальмуванні електрони віддають свою енергію поля, а при прискоренні – отримують її від поля.

Геометрія електродів електронно-оптичної системи гармати наведена на рис. 4.1. Підігрів масивного вольфрамового катода здійснюється у такий спосіб: кільцева нитка-підігрівач (діаметр кільця 8 мм) розігрівається пропусканням через неї змінного струму  $I_{\text{пн}}$  від регульованого джерела прямої напруги з прискорювальною напругою  $U_{\text{пн}}$ . Між ниткою і основним катодом прикладається постійна регульована напруга  $U_{\text{ен}}$ , прискорюючи електронний потік зі струмом  $I_{\text{ен}}$ , який бомбардує катод і нагріває його.

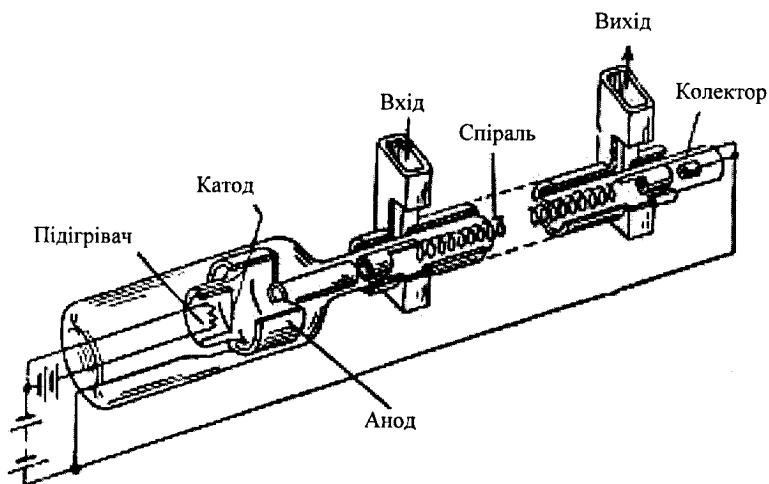


Рисунок 4.1 – Електронна гармата з лампою біжучої хвилі

Змінною напругою електронного нагрівання можна регулювати потужність нагріву катода:  $W_{ен} = U_{ен} \cdot I_{ен}$ . Потужність нагрівання основного катода і його температура регулюються шляхом зміни  $U_{пл}$  і  $U_{ен}$ . Електронний пучок ЛБХ зі струмом  $I$  формується і прискорюється електронно-оптичною системою гармати, що включає катод і анод. Гармата працює в імпульсному режимі за рахунок модуляції прискорювальної напруги.

Схема експериментальної установки наведена на рис. 4.2. Джерело живлення електронної гармати складається з регульованого високовольтного трансформатора з випрямлячем 7 потужністю 100 *кВт* (напруга 10...30 *кВ*, струм до 5 *А*) та електронно-променевого комутатора 8, який формує прямокутні імпульси прискореної напруги амплітудою до 30 *кВ* тривалістю  $\tau_n = 10$  *мс* та скважністю  $Q = 10$ .

Реєстрація імпульсів прискорювальної напруги проводиться за допомогою розподільника напруги 6 і осцилографа С8-13. Струм електронного пучка 12, транспортованого через сповільнювальну систему 3 ЛБХ і прийнятого колектором 4, реєструється за допомогою шунта 5 і осцилографа С8-13.

Система електронного нагрівання катода 1 включає джерело живлення прямого напруження 10, нитку 9 і джерело живлення електронної напруги катода 11.

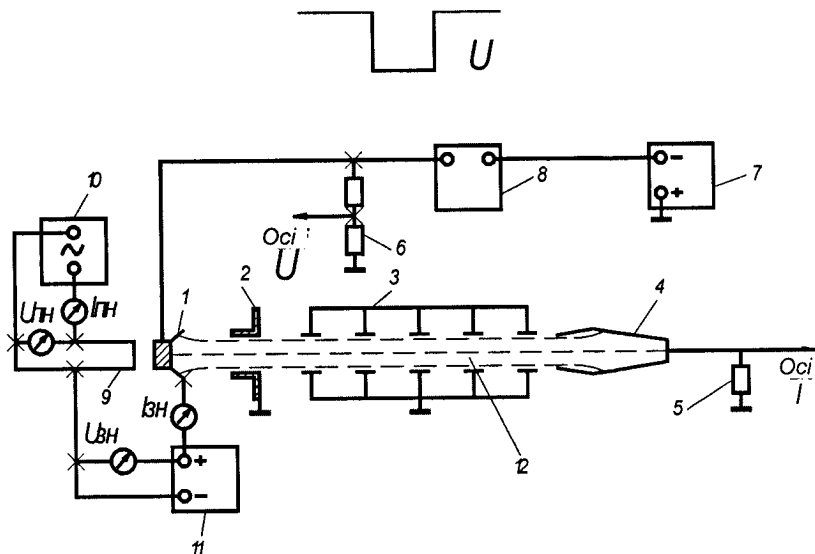


Рисунок 4.2 – Схема живлення електронної гармати: 1 – катод, 2 – анод, 3 – сповільнювальна система ЛБХ, 4 – колектор, 5 – шунт, 6 – розподільник напруги, 7 – трансформатор і випрямляч, 8 – комутатор, 9 – нитка нагріву катода, 10 – джерело живлення напруги нитки, 11 – джерело живлення електронної напруги катода, 12 – електронний пучок

Реєстрація параметрів нагрівання катода ( $I_{пн}$ ,  $U_{пн}$ ,  $I_{ен}$ ,  $U_{ен}$ ) здійснюється за допомогою відповідних стрілкових амперметрів і вольтметрів. Система нагрівання катода знаходиться під високою напругою. Високовольтні джерела живлення, лампа біжучої хвилі знаходяться у спеціальній камері захистів під огорожею зі системою релейного захисту. Всі системи керування і осцилографи розташовані на пульті експериментального стенда.

**Увага! Лабораторна робота проводиться на пульті керування стенда тільки в присутності викладача і обслуговуючого персоналу стенда. Перед виконанням роботи студенти проходять інструктаж з техніки безпеки.**

Для дослідження системи нагрівання термоемісійного катода гармати використовується пульт керування, забезпечений осцилографами і регуляторами напруги джерел живлення із зазначенням відповідних регулювань параметрів нагрівання.

#### 4.2 Завдання для роботи в лабораторії

1. Підготувати до роботи осцилографу і провести їх калібрування відповідно до наявної на стенді технічної документації.
2. Включити джерело живлення електронної напруги і встановити напругу  $U_{ен} = 1,5 \text{ кВ}$ .
3. Виміряти за допомогою осцилографу параметри прискореної напруги на електронній гарматі – величину напруги, тривалість імпульсу, тривалість переднього і заднього фронту імпульсу. Імпульсний режим джерела живлення гармати повинен відповідати таким параметрам:  $U = 20 \text{ кВ}$ ,  $\tau = 10 \text{ мс}$ ,  $Q = 10$ . При цьому тривалості переднього і заднього фронту імпульсу дорівнюють  $20 \text{ мкс}$ .
4. Включити джерело живлення прямого напруження нитки і змінювати струм електронного напруження  $I_{ен}$  шляхом регулювання напруги на нитці  $U_{ен}$ , встановлюються такі значення  $I_{ен} = 50 \text{ мА}$ ,  $100 \text{ мА}$ ,  $150 \text{ мА}$ ,  $200 \text{ мА}$ ,  $250 \text{ мА}$ ,  $300 \text{ мА}$ . Для кожного значення струму  $I_{ен}$  і, відповідно, потужності нагрівання катода  $W_{ен} = U_{ен} \cdot I_{ен}$ , за допомогою осцилографу виміряти струм електронного пучка  $I$  в приладі. Отримані результати занести в таблицю, в якій повинні бути записані значення струмів та потужностей електронного підігріву та пучка.
5. Побудувати залежність струму пучка  $I$  від потужності електронного підігрівання катода  $W_{нк}$ .
6. За результатами виконання п. 4 визначити, при якій потужності нагрівання катода відбувається перехід роботи катода з Т-режиму (режиму поглинання) в Р-режим (режим просторового заряду), і оцінити густину струму емісії катода.
7. Вважаючи, що 25 % потужності, що підводиться до основного катода, витрачається на тепловтрати за рахунок теплопровідності через власні елементи, розрахувати температуру катода і густину струму емісії. Порівняти розраховане значення з отриманим в п. 5.
8. Оцінити ефективність роботи вольфрамового катода при  $T = 2800 \text{ К}$ .
9. Розрахувати термін служби вольфрамового катода, прийнявши допустиме зменшення його первісної маси за рахунок випаровування на 10 %.

#### 4.3 Основні поняття для запам'ятовування

Густина емісійного струму (густина струму насичення) залежить від абсолютної температури згідно із законом Річардсона-Дешмана:

$$j_e = AT^2 e^{-e\phi_a/kT}$$

де  $A$  – постійна Річардсона;

$e\phi_a$  – робота виходу,

$k$  – постійна Больцмана,

$T$  – абсолютна температура.

Для вольфраму  $e\phi_a = 4,52 \text{ eV}$ ,  $A = 6,0 \cdot 10^5 \text{ A/mm}^2 \text{rad}^2$ .

При випаровуванні речовини, що нагрівається в високому вакуумі, швидкість випаровування, тобто маса речовини, яка випаровується з одиниці поверхні за одиницю часу, визначається рівнянням Ленгмюра:

$$\nu = 4,4 \cdot 10^{-4} p \sqrt{\frac{M}{T}},$$

де  $\nu$  – швидкість випаровування ( $\text{г}/(\text{см}^2 \text{с}^{-1})$ );

$p$  – пружність пари ( $\text{Па}$ ) при температурі  $T$  ( $\text{К}$ ),

$M$  – масове число речовини, що випаровується.

Ефективність роботи термокатода ( $\eta$ ) визначається відношенням струму електронного пучка до потужності нагрівання катода

$$\eta = \frac{I}{W_{en}} \left( \frac{A}{Bm} \right),$$

де  $I$  – струм електронного пучка,  $\text{А}$ ;

$W_{en}$  – потужність,  $\text{Вт}$ .

### Зміст звіту

1. Завдання по роботі.
2. Схема ЕОС гармати.
3. Схема джерел живлення і вимірювання параметрів електронної гармати.
4. Таблиця експериментальних даних і залежність струму пучка від потужності нагрівання катода.
5. Результати обробки отриманих даних (пп. 4–8).

### Контрольні запитання

1. Які емісійні характеристики термоемітерів і параметри катодів потужних електронних гармат для технологічних процесів випаровування ви знаєте?
2. Наведіть системи нагрівання термоемітерів і основні схемні рішення.
3. Які особливості конструкції катодно-підігрівальних вузлів?
4. Назвіть основні фактори, що впливають на довговічність термоемісійних катодів в потужних електронно-променевих приладах.
5. Назвіть способи підвищення ефективності катодно-підігрівальних вузлів.

## ЗАХИСТ ВІД ГАЛЬМІВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### Мета роботи

Спроекувати модель для захисту від рентгенівського випромінювання, виходячи з потужності експозиційної дози випромінювання на поверхні виробу при використанні установок для електронно-променевого зварювання.

Визначити товщину захисного шару для різних матеріалів (свинцевистого скла, сталі, бетону, свинцю).

### Прилади й устаткування

Установка експериментальна

Термоелектронна гармата

Пристрій для реєстрації випромінювання

### Хід виконання лабораторної роботи:

- 1) ознайомитися з теоретичними відомостями про небезпеку рентгенівського випромінювання;
- 2) засвоїти методику розрахунку на поверхні захисту від гальмівного рентгенівського випромінювання;
- 3) виконати розрахунки за наведеним прикладом.

### 5.1 Теоретичні відомості

Частка енергії пучка електронів, що перетворюється в енергію рентгенівського випромінювання, не перевищує 1 %. На рис. 5.1 наведено дані про залежність потужності поглиненої дози рентгенівського випромінювання на відстані 1 м від місця бомбардування вольфрамової мішені моноенергетичним електронним пучком від енергії електронів і струму пучка [17]. Ця доза обернено пропорційна квадрату відстані від місця бомбардування. Проте слід враховувати, що загальні витрати матеріалу на екранування установки тим менші, чим ближче екран розташований до джерела випромінювання.

*Експозиційна доза* характеризує іонізуючу спроможність випромінювання в повітрі, вимірюється в кулонах на 1 кг (*Кл/кг*); позасистемна одиниця – рентген (*R*);  $1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ R}$ . За експозиційною дозою можна визначити потенційні можливості іонізуючого випромінювання.

Потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання, що не використовується в будь-якій точці простору на відстані 0,05 м від корпусу установки або спеціальної захисної камери, не повинна перевищувати  $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$  при 41-годинному робочому тижні ( $3,1 \cdot 10^{-4}$  при 36-годинному

робочому тижні) [4, 18]. Слід відмітити, що середня по Україні фонові доза за рік складає за останні роки біля  $1,16 \cdot 10^{-5}$  А/кг [17].

Проектувати захист від рентгенівського випромінювання устаткування, що не використовується, слід виходячи з потужності експозиційної дози випромінювання на поверхні захисту, що складає  $1,16 \cdot 10^{-5}$  А/кг, для більш жорстких умов роботи установки – максимальних значень прискорювальної напруги і струму пучка [12]. Як матеріал мішені при розрахунку зазвичай беруть матеріал з більшим атомним номером. Ослаблення рентгенівського випромінювання самим виробом до уваги не береться.

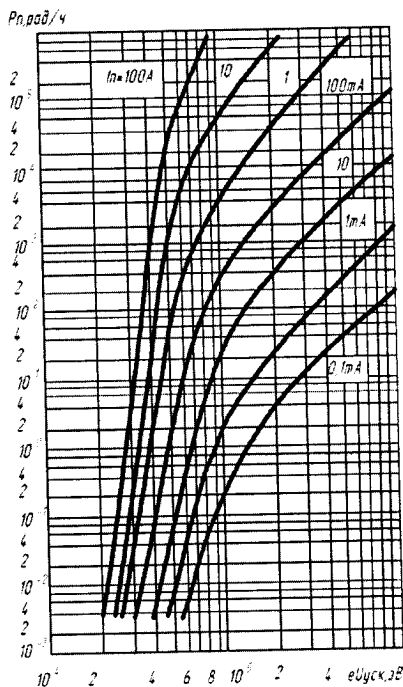


Рисунок 5.1 – Залежність потужності поглиненої дози рентгенівського опромінення на відстані 1 м від місця бомбардування вольфрамової мішені моноенергетичним електронним пучком від енергії електронів при різних струмах пуску

Розрахунок пристроїв, що екранують рентгенівське випромінювання, побудовано на законі ослаблення інтенсивності рентгенівських променів в речовині:

$$K_x = I_x / I_{x0} = \exp(-\mu d),$$

де  $K_x$  – коефіцієнт інтенсивності випромінювання при наявності екрана  $I_x$  у порівнянні з інтенсивністю випромінювання без екрана  $I_{x0}$ ;

$\mu$  – коефіцієнт ослаблення для речовини екрана;

$\delta$  – товщина екрана, мм.

На рис. 5.2 наведена залежність півтовщини екрана  $\delta_{0,5}$  (тобто товщина матеріалу, що ослаблює інтенсивність випромінювання у 2 рази) від енергії електронів для різних матеріалів екранів [4].

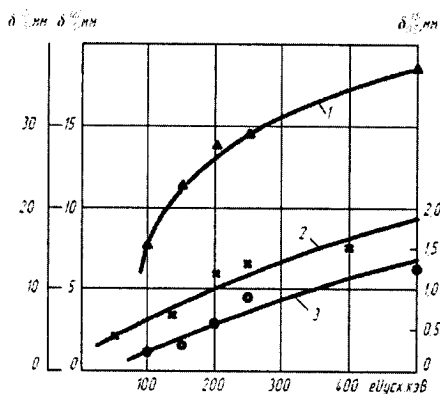


Рисунок 5.2 – Залежність півтовщини екрана  $\delta_{0,5}$  від енергії електронів для різноманітних матеріалів екранів:  
1 – сталь, 2 – свинець, 3 – бетон

Захисні властивості рентгенівського скла характеризуються свинцевим еквівалентом, тобто товщиною шару свинцю в міліметрах, що ослаблює рентгенівське випромінювання в ту ж саму кількість разів, що і визначене захисне рентгенівське скло. Нижче в табл. 5.1 наведено свинцевий еквівалент захисного рентгенівського скла ТФ-5 для прискорювальної напруги  $U_{пр} = 180 \dots 200$  кВ в залежності від його товщини (за ГОСТ 9541 – 95):

Таблиця 5.1 – Свинцевий еквівалент захисного рентгенівського скла

Товщина скла, мм	Свинцевий еквівалент не менш, мм
10	2,5
15	4,0
20	5,0
25	6,5
50	13,5



## 5.2 Приклад розрахунку

Визначимо необхідний коефіцієнт ослаблення інтенсивності  $K_x$  випромінювання за рис. 5.1. Враховуючи, що величина допустимої потужності дози випромінювання на поверхні захисту складає  $1,16 \cdot 10^{-5} \text{ A/кг}$ , за допомогою рис. 5.3 знаходимо необхідну товщину екрана  $\delta_{0,5}$ , що знаходиться через півтовщину. При розрахунку рекомендовано вводити двократний запас добротності захисту, тобто збільшити розрахункове значення на один шар половинного ослаблення [17].

Наприклад, при використанні пучка електронів зі струмом  $1 \text{ A}$  і енергією  $120 \text{ keV}$  потужність поглиненої дози відповідно до рис 5.1 складає  $166,7 \text{ Дж (кг}\cdot\text{с)}^{-1}$  і  $K_x = 1,8 \cdot 10^{-8}$ . При цьому відповідно до рис. 5.3 маємо  $\delta_{0,5} = 26 \text{ мм}$ . За допомогою рис. 5.2 знаходимо, що для свинцю  $\delta_{0,5} = 0,25 \text{ мм}$ , для сталі і бетону відповідно  $3,5$  і  $10 \text{ мм}$ . Таким чином, товщина захисту з урахуванням двократного запасу добротності складає  $6,7 \text{ мм}$  для свинцю,  $95 \text{ мм}$  для сталі,  $270 \text{ мм}$  для бетону,  $30 \text{ мм}$  для свинцевистого скла.

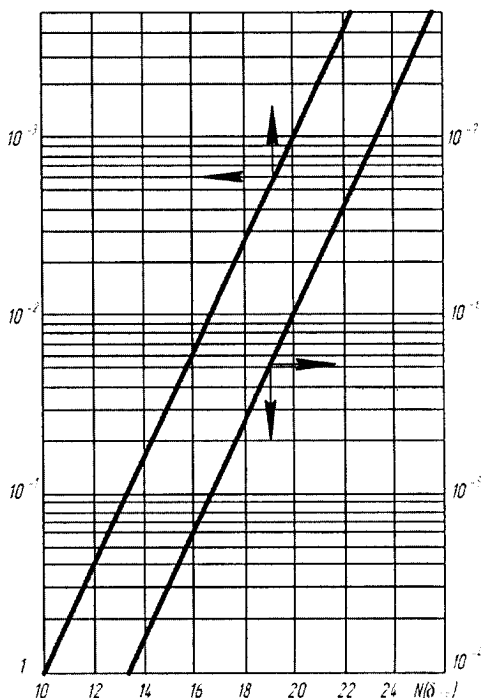


Рисунок 5.3 – Залежність коефіцієнта ослаблення рентгенівського випромінювання  $K_x$  від товщини екрана  $N/\delta_{0,5}$

Основні вимоги щодо забезпечення безпеки при експлуатації електронно-променевих установок регламентуються відповідними правилами.

### **Зміст звіту**

1. Стислі теоретичні положення, що характеризують основні показники гальмівного рентгенівського випромінювання.
2. Схематичний склад свинцевого еквіваленту захисного рентгенівського скла ТФ-5 для прискорювальної напруги 180 ... 200 кВ в залежності від його товщини. (за ГОСТ 9541 – 96).
3. Виконати розрахунок (математичну модель) необхідного коефіцієнта ослаблення інтенсивності  $K_x$  гальмівного рентгенівського випромінювання.
4. Стислі висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Які границі встановлено для значень потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання?
2. Яким має бути значення потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання для проектування пристроїв захисту від рентгенівського випромінювання?
3. Яким має бути матеріал мішені при розрахунку параметрів пристроїв для захисту від рентгенівського випромінювання?
4. Який закон визначає ослаблення інтенсивності рентгенівських променів в речовині?
5. Що означає термін «свинцевий еквівалент»?
6. Як враховують значення свинцевого еквіваленту при розрахунку захисних властивостей рентгенівського скла?
7. Які марки рентгенівського скла можуть бути рекомендовані до використання за ГОСТ 9541 – 95?

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВАКУУМНОЇ УСТАНОВКИ «БУЛАТ-3Т»

### Мета роботи

Вивчення і знайомство з принципами роботи і будовою промислового технологічного обладнання для реактивного напилення захисних покриттів у вакуумі за допомогою плазово-дугових випарників.

### Прилади та обладнання

Вакуумна установка «Булат-3Т».

Система стабілізації та керування тиском.

Балон зі стиснутим азотом.

### Хід виконання лабораторної роботи

- Ознайомитись із загальною схемою вакуумної установки «Булат-3Т».
- Вивчити схему енергозабезпечення установки.
- Вивчити засоби нагрівання та охолодження робочої камери та плазово-дугових випарників.
- Ознайомитись з послідовністю операцій та прийомів роботи на установці «Булат-3Т»(на прикладі напилення плівок TiN).

## 6.1 Теоретичні відомості

### 6.1.1 Призначення та технічні дані установки

Агрегат «Булат-3Т» призначений для синтезу твердих зносостійких матеріалів (карбідів, нітридів) і нанесення їх у вигляді покриттів (зносостійких, захисних, декоративних, струмопровідних тощо) на різальний інструмент та деталі машин.

Технічні дані установки [14].

1. Площа поверхні напилення під одним випарником:  $2 \text{ дм}^2$ .
2. Швидкість осаджування плівки на відстані 270 мм від випарника:  $10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ мкм/с}$ .
3. Робочий тиск у камері:  
 $2,66 \cdot 10^{-1} \dots 6,65 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$  ( $2 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ ).
4. Напруга мережі: 380/220 В, 50 Гц.
5. Потужність, що споживається в режимі напилення: 20 кВт.

### 6.1.2 Будова і робота установки «Булат-3Т»

Загальна структурна схема вакуумної установки «Булат-3Т» подана на рис. 6.1.

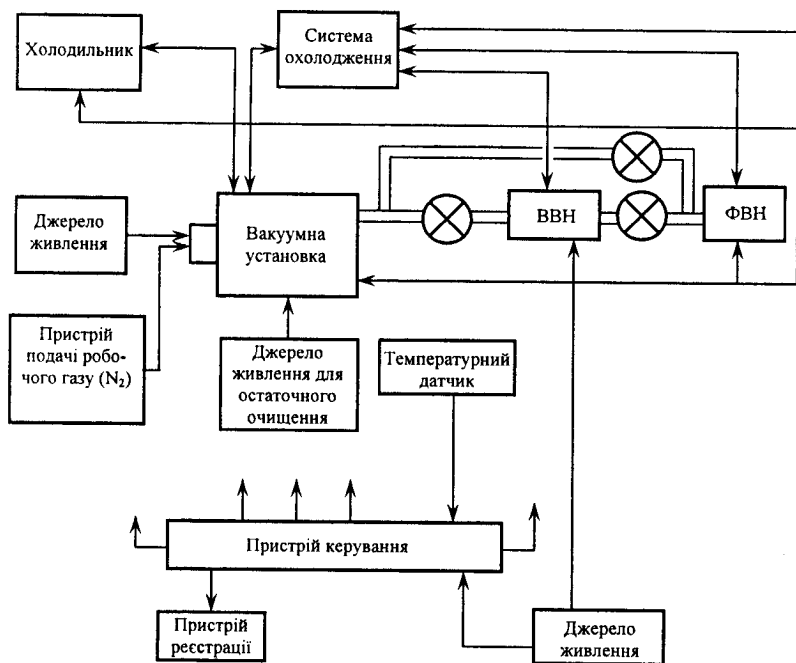


Рисунок 6.1 – Структурна схема «Булат-3Т»

Електрообладнання агрегату «Булат-3Т» забезпечує:

- електричне живлення і стабілізацію електродугового розряду, катодної плями та електричної дуги;
- автоматичний підпал дуги при її спонтанному згасанні тощо.

Згідно з технологічним процесом роботу електрообладнання можна поділити на три режими: прогрівання, очищення, наплення.

Схема функціональна пристрою «Булат-3Т» наведена на рис 6.2. Схема містить такі елементи:

- затвор вакуумний типу ЗВЭ-250 – 1ЕЗ;
- клапани вакуумні з електромеханічним приводом типу ВЭП-63 – 1В ... 4В;
- вентилі фланцеві вакуумні з електромагнітним приводом – 5В, 6В;
- регулятор – 1АВ;
- дифузійний насос – 1Н;
- насоси форвакуумні – 2Н, 3Н;
- перетворювачі манометричні іонізаційні – 1Л, 2Л;
- перетворювачі манометричні термопарні – 3Л, 4Л, 5Л;
- вакуумметр іонізаційний термопарний ВІТ.

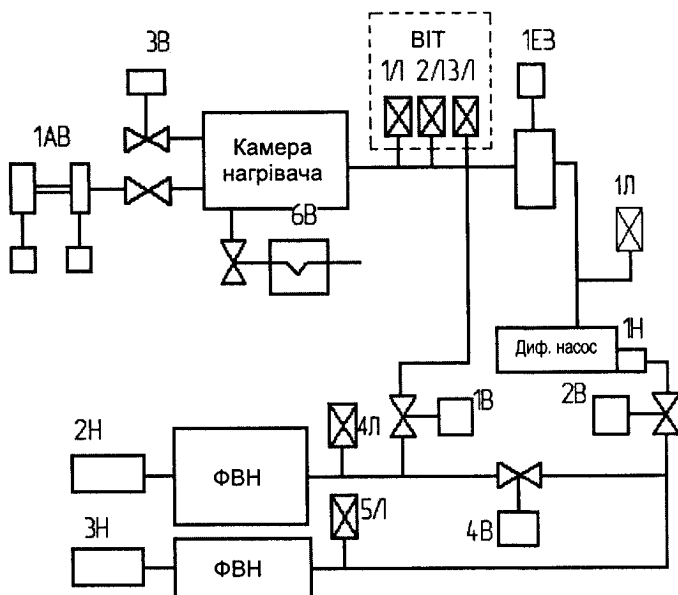


Рисунок 6.2 – Схема функціональна агрегату «Булат-3Т»

Камера нагрівача являє собою циліндричний посуд. З обох боків камери на петлях кріпляться кришки. На камері і кришках розташовані шість патрубків з фланцями (4 на камері і по одному на кожній кришці, до яких кріпляться: вікно оглядове, пристрій зворотний, випарники, перехідник до систем вакуумного очищення). До корпусу камери і кришок припаяні мідні труби, по яких протікає вода (гаряча, у режимі прогріву і холодна, у режимі роботи).

Камера з'єднана перехідником з високовакуумним агрегатом. Каркас призначений для розміщення в ньому камери, агрегату високовакуумного, нагрівача.

Випарник призначений для створення потоку плазми з матеріалу катода. Катод являє собою монолітний циліндр, на випарюваному кінці якого є буртик, який перешкоджає виходу катодної плями при горінні дуги на бокову поверхню циліндра. На другому кінці закріплений наконечник, через який до катода подається вода. Катодний вузол приєднується до силової мережі.

Пристрій підпалювання служить для підпалювання дуги шляхом переміщення електрода. Котушка забезпечує рівномірне випаровування матеріалу катода під впливом її магнітного поля на переміщення катодної плями.

Водяна система призначена для прогрівання установки водою з метою видалення газу з внутрішніх поверхонь камери у режимі підготовки при-

строю до роботи, у робочому режимі – для охолодження камери. Система охолодження працює тільки з вільним зливом води.

Форвакуумна лінія являє собою трубопровід, який з'єднує механічний форвакуумний насос з камерою і високовакуумним агрегатом. На форвакуумній лінії встановлено електромагнітний клапан, два вакуумні вентиля, дросельний клапан, вимірювальний блок та компенсатор. Вимірювальний блок призначений для вимірювання тиску у форвакуумній лінії.

Режим напилення призначений для нанесення зміцнювального покриття на оброблюваний виріб у атмосфері азоту чи іншого газу під тиском  $1 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст. у робочому об'ємі камери. В режимі напилення проводиться конденсація матеріалу катода, що випаровується, на підкладку. При взаємодії матеріалу катода з атомами легуючого газу відбувається утворення хімічної сполуки, що конденсується на оброблювану поверхню. Це викликає створення на оброблюваній поверхні покриття з вмістом нітриду матеріалу катода.

### 6.1.3 Властивості напилюваних плівок

Властивості плівок нітриду титану (табл. 6.1):

- добрий опір до стирання;
- мінімальний коефіцієнт тертя;
- добре зчеплення з матеріалом (*адгезійна міцність*), що піддається зміцненню плівкою;
- високий опір окисненню;
- висока теплоізоляційна властивість;
- висока температуростійкість.

Таблиця 6.1 – Властивості нітриду титану

Назва властивості	Параметри
Вміст нітриду титану, %	0,97
Вміст неметалу, %	22,63
Мікротвердість, МПа	20500
Рентгенівська пильність, кг/м <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>
Максимальна температура стійкості складу, °C	2960
Колір	темно-бронзовий

Нітрид титану (TiN) використовується при виготовленні високопродуктивного (ріжучого) інструменту з непереточувальними пластинами з твердих сплавів як зносостійке покриття.

До технології нанесення плівок відносяться: осадження покриттів з газової фази, конденсація речовини з плазмової фази в умовах іонного бомбардування.

В основі методу зміцнення інструмента з утворенням на поверхні хімічної сполуки лежить принцип створення зносостійкого покриття в результаті хімічної реакції між нітрохлоридом титану і азотом, воднем або метаном [1]. В процесі осадження з газової фази на гранях кристалічної ґратки у вигляді нальоту утворюються центри кристалізації, і відбувається ріст кристалів у вигляді колоній, які створюють пірамідальну поверхневу структуру. Температура проходження процесу 850...1050 °С. Швидкість протікання залежить від тиску газу і температури підкладки. Адгезія покриття з основою визначається опором поверхні основи дії парів соляної кислоти. Водневе оточення та різні коефіцієнти термічного розширення також виступають важливими чинниками міцності зчеплення напиленого покриття з основою.

Послідовність операцій забезпечення функціонування вакуумної системи подано в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Параметри установки «Булат-3Т»

Прилади Послідовність комутації елементів вакуумної системи	Насоси			За- тво р	Вентилі, клапани							
	1Н	2Н	3Н		1В	2В	3В	4В	5В	6В	1АВ	
Форвакуумне відкачування нагрівальної камери одним механічним насосом		+		-	+	-		-				
Форвакуумне відкачування нагрівальної камери двома механічними насосами		+	+	-	+	-		-				
Відкачування нагрівальної камери дифузійним насосом	+	+	+	+	-	+		+				
Відкачування дифузійного насоса в період завантаження-відвантаження нагрівальної камери	+		+	-	-	+		-				
Подача робочого газу в нагрівальну камеру											+	
Напуск повітря в нагрівальну камеру								-			+	+
Вентиляція нагрівальної камери								+			-	

Метод включає в себе два етапи:

- очищення, нагрівання та активація поверхні підкладки бомбардуванням іонами матеріалу осадження, прискореними до енергії необхідного значення;
- осадження покриття з неперервним іонним бомбардуванням конденсату у режимі, що забезпечує оптимальні умови його формування з певними характеристиками.

### **Зміст звіту**

1. Вивчити структуру і функціональне призначення окремих підсистем вакуумної технологічної установки «Булат-3Т».
2. Скласти загальну структурну схему установки.
3. Скласти схему газодинамічної і вакуумної системи.
4. Описати методи отримання та вимірювання вакууму.
5. Описати принципи роботи вакуумного дугового випарника і маршрутну технологічну карту процесу напилення плівки TiN.
6. Описати властивості і області використання покриттів з TiN.
7. Короткі висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Які переваги та недоліки методу плазово-дугового напилення плівкових покриттів ви знаєте?
2. Вкажіть шляхи руху газових потоків на різних етапах відкачування повітря з робочої камери.
3. Як оптимізувати енергетичні затрати на проведення технологічного процесу на установці «Булат-3Т»?
4. Наведіть функціональну схему енергозабезпечення та призначення кожного джерела живлення.
5. Що таке стехіометричний склад покриття?
6. Як змінюються властивості покриттів в залежності від складу плівки (на прикладі TiN)?
7. Як виконується фінішне очищення поверхні перед нанесенням покриття?
8. Якими технологічними засобами можна прискорити отримання необхідного вакууму?
9. Поясніть схему запалу та підтримки дугового розряду.
10. Поясніть фізичні процеси в катодній плямі дугового розряду з випарювальним катодом.
11. У який спосіб можна забезпечити необхідну швидкість утворення хімічної сполуки TiN?



## ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ВАКУУМНА ГІГІЄНА ПРИ РОБОТІ З УСТАТКУВАННЯМ І МАТЕРІАЛАМИ ВАКУУМНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

### Мета роботи

Ознайомитися з деякими особливостями техніки безпеки при роботі з устаткуванням і матеріалами вакуумної технології та основами вакуумної гігієни.

### Прилади й устаткування

До складу установки входять:

Омметри на постійному і змінному струмах.

Електрохімічна комірка.

Прилади для вимірювання температури, вологості і радіаційного фону навколишнього середовища.

### Хід виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з конструкціями приладів і зафіксувати температуру, тиск, вологість і радіаційний фон у лабораторії.

Заміряти електропровідність фізіологічного розчину ( $\text{NaCl}$  або  $\text{CaCl}_2$  – 3 % у воді) на постійному і змінному струмах.

Заміряти власну електропровідність, наприклад, між руками і відразу ж визначити частоту власного пульсу. Проробити ці виміри 2...3 рази з інтервалом 10...20 хвилин. Вивчити основні вимоги вакуумної гігієни.

На підставі отриманих даних, розрахувати величини небезпечних для здоров'я і для життя напруг постійного і змінного струмів. Оцінити зниження величин цих напруг при порушенні шкіряного покриву.

## 7.1 Теоретичні відомості

### 7.1.1 Небезпека електровакуумної техніки і технології

У вакуумній технології електронних приладів використовуються різноманітні речовини і технологічні процеси, що призводять до токсичної (шкідливої) дії на людину.

Кращими засобами, що гарантують від нещасних випадків, є: добре попереднє підготування до виконання роботи, знання теорії питання, знайомство з методикою виконання роботи, знання правил експлуатації устаткування і їхнє дотримання, гранична зібраність і увага в ході виконання роботи, а також дотримання спеціальних правил техніки безпеки.

Основними джерелами небезпеки є:

- скляні елементи систем, що знаходяться під вакуумом;
- частини електродвигунів і насосів, що рухаються;

- невміння, недбале поводження з отруйними, вогне- і вибухонебезпечними речовинами;
- високі електричні напруги, які підводяться до вимірювального устаткування, й електромагнітні поля різних частот.

Стінки скляних посудів, що знаходяться під вакуумом, відчувають односторонній зовнішній тиск, приблизно одну атмосферу. Під впливом цього тиску, при великих внутрішніх напруженнях у склі, виникає небезпека руйнації скла. При руйнації осколки скла розлітаються у всі сторони і можуть викликати травми. Тому для безпечної роботи рекомендуються: усі скляні посуду великих розмірів закривати чохлами з тканини; напускати повітря в відкочувальну систему повільно, злегка відкриваючи крани, не натискати на пробки кранів при їхньому обертанні і взагалі не прикладати до них великих зусиль; не допускати швидкого нагрівання й охолодження окремих ділянок вакуумної скляної системи. Потенціальна енергія, що міститься у вакуумному об'ємі  $V$ , дорівнює  $A = (p_i - p_0) \cdot V$ , [Дж], а кінетична енергія всіх осколків  $E = mv^2/2$  [Дж].

### 7.1.2 Робота зі шкідливими речовинами

Шкідливі речовини, що використовують у вакуумній технології [2], розділяються на групи, для кожної з яких установлений певний порядок збереження (табл. 7.1).

Допускається збереження балонів із горючим газом разом з інертними газами (азотом, аргоном, гелієм, неоном). Балони із сірководнем беруть під навісом на відкритому повітрі.

Збереження і розлив кислот і лугів припускається тільки в ізольованому приміщенні, оснащеному припливно-витяжною вентиляцією. Не можна зберігати їх у підвальних приміщеннях, а також поблизу нагрітих поверхонь і незахищеними від дії сонячних променів. У місцях збереження і використання кислот повинні знаходитися вапно, крейда або сода для нейтралізації кислот.

У зв'язку з тим, що при змішуванні міцних кислот із керосином, бензином і іншими займистими рідинами підвищується температура, у результаті чого можливі загоряння і вибух, не варто зберігати їх разом навіть у незначних кількостях. Не можна також зберігати сірчану кислоту з іншими кислотами, особливо з азотною.

Азотну, сірчану, соляну й оцтову кислоти в кількості до 30...35 л можна зберігати на складі в скляних пляшках, що знаходяться в плетених кошиках або загородженні із відповідними написами. Кислоти в кількості до 10 л при роботах у лабораторіях беруть у звичайних реактивних склянках із написами, що вказують назву кислоти і її концентрацію. Ємності з кислотами, лугами поміщають у кошики або обрешітки, вистелені соломою або стружкою, просочені розчином хлористого магнію.

Таблиця 7.1 – Порядок збереження шкідливих речовин

Група речовин	Виключити спільне збереження з речовинами груп	Умови збереження
<b>I Вибухові речовини:</b> динаміт, нітрогліцерин, гримучий газ, димний і бездимний порох тощо	II, III, IV, V, VI, VII, VIII	спец. вогнестійкі сховища, землянки
<b>II Хлорати і селітри:</b> селітри: амонійна, калієва, кальцієва, натрієва тощо	I; III a; IV; V; VI; VII	вогнестійкі сховища
<b>III Стиснені і зріджені гази:</b> а) <i>горючі і ті, що підтримують горіння:</i> ацетилен, водень, водяний газ, стиснуте і рідке повітря, дивініл, кисень, нафтовий газ, окис етилену, пропілен, сірководень; б) <i>негорючі гази:</i> азот, аргон, гелій, неон, сірчистий ангідрид, вуглекислий газ	I, II, IV, V, VII, VIII; різномірних газів груп III а  IV, V, VIII	спеціальні вогнестійкі сховища або відкрите повітря під навісом; ізольовані відділення загальних сховищ
<b>IV Самозаймісті речовини:</b> карбід кальцію, металевий калій, кальцій і натрій, фосфор жовтий, фосфористі кальцій і натрій, промаслені і волокнисті матеріали й стружка	I, II, III, V, VII, VIII	ізольовані відділення загальних вогнестійких сховищ
<b>V Легкозаймісті рідини:</b> ацетон, бензин ксилол, нафта, сірковуглець, скипидар, ефіри органічних кислот, ефір сірчаний і петролейний	I, II, III a, б; IV; VII; VIII	спеціальні вогнестійкі сховища
<b>VI Отруйні і сильнодіючі речовини:</b> миш'яковий ангідрид, миш'якові препарати, солі ртутні, солі ціаністі, фосген, хлор, хлорпікрин	I; IV; V; VIII	спеціальні закриті приміщення
<b>VII Речовини, що можуть викликати запалення:</b> бор, марганцево-кислий калій (KMnO <sub>4</sub> ), сильні кислоти (азотна (HNO <sub>3</sub> ), сірчана (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )), хлориди органічні, хромна кислота і її солі	I, II, III a; IV; V; VI; VIII	речовини, ізольовані одна від одної
<b>VIII Легкозаймісті матеріали:</b> вата, джут, саж, прядиво, солома, стружка деревна, бавовна, тріска	I, I, III, IV, V, VI, VII	ізольовано від речовин інших груп

Перевозять їх у спеціальних візках, причому на один візок не можна ставити більше двох сулій. Пляшки не можна виймати з кошиків, ставити на підлогу, стіл і інші місця. Склянки з кислотами, лужними й іншими їдкими речовинами переносяться в ящиках або металевих посудинах, вкладених азбестом.

Отруйні речовини, які застосовують в цехах і лабораторіях, варто зберігати в опломбованому сейфі в добре закупореному посуді з етикеткою «Отрута» і назвою речовини.

Збереження, видачу і проведення операцій із отруйними речовинами здійснюють у повній відповідності зі встановленими обов'язковими правилами.

Легкозаймісті і горючі рідини в лабораторних приміщеннях варто зберігати в товстостінних скляних банках із притертими пробками. Ці банки вкладають у контейнер із кришкою, що закривається, стінки і дно якого вистелені азбестом.

Легкозаймісті рідини доставляють до місця роботи в закритій посудині, яка не б'ється, або скляній тарі поміщеній у футляр: при перенесенні посудин із гарячою рідиною варто користуватися рушником, підтримуючи посудину двома руками: однією – притримуючи дно, а іншою – горловину посудини. Великі хімічні склянки піднімають двома руками так, щоб відігнуті краї склянки спиралися на вказівні пальці.

Особливу увагу і обережність необхідно проявляти при використанні приладів, що містять ртуть. Пари ртуті є небезпечною отрутою. Навіть при малих концентраціях пари ртуті її тривале дихання може призвести до серйозних отруєнь, тому що ртуть має властивість накопичуватися в організмі людини. При кімнатній температурі тиск пари ртуті складає  $10^{-3}$  мм. рт. ст., але вже при настільки малому тиску концентрація пари перевищує допустиму (ГДК –  $0,0003$  мг/м<sup>3</sup>). Тому забороняється зберігати ртуть у відкритих посудинах. Всі роботи, пов'язані з переливанням ртуті, роблять на спеціальному столі, виконаному у формі корита. Пролита ртуть негайно збирається, а те місце обробляється колоїдною сіркою або перекисом водню.

Приміщення, у яких працюють із ртуттю, добре провітрюють. Гази й пари відкачуваних установок, в яких є ртуть (манометри Мак-Леода), не повинні викидатися в робоче приміщення. Переміщення ртуті в манометрах Мак-Леода проводиться обережно, тому що при швидких її переміщеннях і при ударах може руйнуватися скло.

### 7.1.3 Електробезпека

Значне число нещасних випадків відбувається в результаті доторкання людини до частин установок, що у робочому або аварійному режимах знаходяться під напругою. При цьому через тіло людини проходить елек-

тричний струм, дія якого на людський організм виражається в ураженні внутрішніх і зовнішніх органів (серця, органів дихання, нервової системи, шкірного покриву, м'язів). Тіло людини має певний електричний опір, що змінюється в широких межах (500...10 000 Ом) і залежить від багатьох причин:

- товщини і стану шкірного покриву і його вологості;
- умов навколишнього середовища;
- тривалості дії струму;
- стану здоров'я;
- одягу, взуття тощо.

Ступінь ураження організму струмом істотно залежить від тривалості його впливу. Найбільший опір струмові робить верхній прошарок шкіри. Шкірний покрив, що чинить найбільший в порівнянні з іншими ділянками тіла опір, піддається інтенсивному нагріванню, а потім обвугленню. При цьому відбувається різке зниження опору і струм в організмі збільшується, викликаючи теплову руйнацію внутрішніх органів. Людина відчуває струм частотою 50 Гц при  $I \geq 0,05$  мА, а при струмах 5...15 мА відчуває неприємні відчуття. При струмах більше 100 мА наступають судороги і фібриляція серця, що призводить до смерті. Тому припустимим вважається струм, що без суттєвого дискомфорту витримує людина  $I \leq 0,06...0,1$  мА. Смертельна доза енергії при ураженні людини електричним струмом складає  $E = I \cdot U \cdot t \geq 2$  кДж.

Важкість електротравми залежить від шляху струму через тіло людини, тобто від місць на його тілі, якими він доторкнувся до струмоведучих частин. Напругою дотику називається напруга, що виникає між двома точками в колі струму, котрих одночасно може торкнутися людина.

Для забезпечення електробезпеки повинні застосовуватися окремо або в поєднанні один з одним такі технічні засоби (за ДСТУ 7237:2011 та ГОСТ 12.1.019-79):

- захисне заземлення;
- занулення, вирівнювання потенціалів;
- електричне поділення мереж;
- захисне відключення;
- ізоляція струмоведучих частин (робоча, додаткова, посилена, подвійна);
- огороження пристроїв для запобігання ураження людини струмами замикання на землю;
- попереджувальна сигналізація; блокування; знаки безпеки; засоби захисту і захисні приладдя.

#### 7.1.4 Класифікація умов роботи за ступенем електробезпеки (за ГОСТ 12.1.0113-78)

Умови з підвищеною небезпекою ураження людей електричним струмом [3]:

- наявність вологості (пара або волога, що конденсується, яка виділяється у вигляді дрібних крапель, і відносна вологість повітря більша 75 %);
- наявність провідного пилу (технологічний або інший пил, осідаючи на дротах, протікаючи всередину машин і апаратів і відкладаючись на електроустановках, погіршують умови охолодження й ізоляції, але не викликають небезпеки пожежі або вибуху);
- наявність струмопровідних основ (металевих, земляних, залізобетонних, цегельних);
- наявність підвищеної температури (незалежно від пори року і різних теплових випромінювань температура перевищує: довгостроково 35 °С, короткочасно 40 °С);
- наявність можливості одночасного дотику людини до з'єднаних із землею металоконструкцій будинків, технологічних апаратів, механізмів і ін. з однієї сторони і до металевих корпусів електроустаткування – з іншої.

Особливо небезпечні умови ураження людей електричним струмом:

- наявність вологості (дош, сніг, часте обприскування і покриття вологою стелі, стін, предметів, що знаходяться всередині приміщень);
- наявність хімічно активного середовища (постійно або довгостроково містяться агресивні пари, газу, рідини, утворюються відкладення або цвіль, що діють руйнівно на ізоляцію і струмоведучі частини електроустаткування);
- наявність одночасно двох або більше умов підвищеної небезпеки.

Умови без підвищеної небезпеки ураження людей електричним струмом – відсутність умов, що створюють підвищену або особливу небезпеку.

Електроустановки за мірами електробезпеки поділяються на:

- електроустановки напругою більше 1000 В в мережах з ефективно заземленою нейтраллю (із великими струмами замикання на землю);
- електроустановки напругою більше 1000 В в мережах з ізольованою нейтраллю (із малими струмами замикання на землю);
- електроустановки напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю;
- електроустановки напругою до 1000 В із ізольованою нейтраллю.

У чотирипровідних мережах трифазного струму і трипровідних мережах постійного струму глухе заземлення нейтральної або середньої точки джерела струму обов'язкове.

Електроустановки напругою до 1000 В змінного струму із ізольованою нейтраллю варто застосовувати при підвищених вимогах безпеки (для пересувних установок торф'яних розробок, шахт). Для них заземлення

повинно поєднуватися із контролем ізоляції мережі або захисного відключення.

*Роботи, які проводяться в діючих установках, відносно заходів безпеки поділяються на категорії:*

- при повному знятті напруги;
- з частково знятою напругою;
- без зняття напруги поблизу і на струмоведучих частинах;
- без зняття напруги з частин, віддалених від струмоведучих частин, що знаходяться під напругою.

*Технічні заходи для безпечного проведення робіт з частковим або повним зняттям напруги в установках до 1000 В*

Відключаються всі силові й інші трансформатори з боку вищої і нижчої напруги. Відключення може бути виконане:

- комутаційним апаратом із ручним керуванням;
- контакторами з автоматичним приводом і дистанційним керуванням при знятті запобіжників оперативного струму від'єднанням кінців вмикаючої котушки.

При відсутності переносних заземлень, приймають додаткові заходи: знімають запобіжники, застосовують ізольовані накладки в рубильниках і автоматах, відключають кінці живильних ліній тощо.

Перевірка відсутності напруги на мережах до 1000 В виконується покажчиком напруги або переносним вольтметром. Безпосередньо перед застосуванням покажчика напруги його справність повинна бути перевірена шляхом наближення до струмоведучих частин, що знаходяться під напругою, або за допомогою спеціального приладу. Відсутність напруги повинна перевірятися на усіх фазах. Перевірка проводиться в діелектричних рукавицях. Застосування контрольних ламп припускається при лінійній напрузі до 220 В.

### **7.1.5 Захист від випромінювань**

Джерелами рентгенівського випромінювання є високовольтні діоди – кенотрони, потужні генераторні і модуляторні лампи різних діапазонів частот. Джерелами рентгенівського випромінювання також є потужні надвисокочастотні підсилювачі і генератори – клістри, лампи біжучої хвилі, магнетрони й інші прилади НВЧ.

Рентгенівське випромінювання є одним із видів іонізуючих випромінювань. При проходженні через біологічні тканини воно вибиває з атомів електрони, які переміщуються в тканинах і у свою чергу іонізують інші атоми. У результаті відбувається розривання міжмолекулярних зв'язків, зміна структури і руйнація молекул. Природно це призводить до порушення функціонування, росту і розмноження клітин. У свою чергу, за цим порушується

**РЕПЛИКА ОДНОСТУПІНЧАСТА** (one stage replica) – репліка, яка знята безпосередньо з поверхні зразка і одержана окисненням поверхні, або нанесенням шару пластика чи напиленням металу на цю поверхню.

**РЕПЛИКА ДВОСТУПІНЧАСТА** (two-stage replica) – репліка, яка знята з контактної боку проміжного відбитка.

**РОБОТА ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА** ((electronic) work function) – додаткова кількість енергії, яку необхідно надати вільному електрону, що знаходиться в твердому тілі, для того, щоб він зміг вилетіти з цього тіла. Витрачається на подолання сил тяжіння електрона, що покидає тіло, до іонів в поверхневому шарі тіла та залежить від властивостей даного матеріалу і від структури поверхні.

**СИСТЕМА** (system) – будь-яка речовина (метал, сплав), яка складається з певної сукупності фаз.

**СФЕРИЧНА АБЕРАЦІЯ** (spherical aberration) – виникає внаслідок того, що електрони проходять на різних кутових відстанях від оптичної осі лінзи і тому по-різному фокусуються. С.а. зменшують накладенням суворих обмежень на геометрію полюсних наконечників лінз, збільшенням прискорювальної напруги і зменшенням діафрагми. У цьому випадку потік формується електронами, меншою мірою відхиленими від оптичної осі лінзи.

**ТЕРМОЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ** (ефект Річардсона, ефект Едісона) (thermoemission) – явище випускання електронів нагрітими тілами. Концентрація вільних електронів в металах достатньо висока, тому навіть при середніх температурах внаслідок розподілу електронів за швидкостями (за енергією) деякі електрони мають енергію, достатню для подолання потенціального бар'єра на границі металу. З підвищенням температури кількість електронів, кінетична енергія теплового руху яких більша за роботу виходу, зростає. При цьому явище термоелектронної емісії стає помітним.

**ТИСК** (pressure) – сила, що діє на одиницю площі поверхні:  
 $p = F/S [Па]$ .

**ТИСК НАСИЧУВАЛЬНОЇ ПАРИ** – незалежний при постійній температурі від об'єму тиск  $p_0$ , при якому рідина знаходиться в динамічній рівновазі зі своєю парою.

**ТИСК ПАРЦІАЛЬНИЙ** (partial pressure) – тиск, під яким знаходився б газ, якби з суміші були видалені залишки газів, а об'єм і температура збереглися б попередніми.

**УЛЬТРАМІКРОТОМ** (ultramikrotome) – прилад для одержання тонких зразків спеціально підготовлених об'єктів (завтовшки до 1000 нм) для електронної мікроскопії.

**ФАЗА** (faze) – це хімічно однорідна частина сплаву, відокремлена від інших його частин поверхнею поділу (межею).

**ФЛУОРЕСЦЕНЦІЯ** (fluorescence) – явище люмінесценції, яке дуже швидко затихає після закінчення спонтанного переходу збуджених молекул (атомів) в нормальний стан. За спектрами флуоресценції та її затухання



## Зміст звіту

Експериментальні дані і висновки до них.  
Відповіді на контрольні запитання.

### Контрольні запитання

1. Сформулюйте поняття вакуумної гігієни. Наведіть граничні параметри вакуумної гігієни.
2. Шляхи забезпечення умов гігієни при використанні вакуумної технології.
3. Оцініти енергію  $1 \text{ м}^3$  вакууму і максимальної швидкості осколків скла при руйнації скляного вакуумного балона.
4. В скільки разів перевищує вміст ртуті в повітрі ГДК при розливанні ртуті в непродіряваних приміщеннях? Чим пояснити нейтралізуючу дію на ртуть колоїдної сірки і перекису водню? Напишіть рівняння реакцій. Описати методи збору крапель ртуті.
5. У лабораторії було пролито 200 г фреона (дифторхлорметана) або ацетону (диметилкетона). Визначте кількість вдихуваних вами молекул пролитого реактиву за один вдих, якщо припустити, що весь пролитий реактив розподіляється в атмосфері земної кулі (прийняти прошарок атмосфери рівним 10 км).
6. Чому карбід кальцію не можна зберігати в підвальних приміщеннях? Напишіть рівняння реакцій.
7. Назвіть основні способи і засоби забезпечення електробезпеки при проведенні лабораторної роботи.
8. Що гарантує від нещасних випадків при виконанні робіт, пов'язаних з використанням устаткування і матеріалів вакуумної технології?
9. Визначить товщину захисного екрана електронно-променевої технологічної установки (індивідуальне завдання).

## ГЛОСАРІЙ

**АБЕРАЦІЯ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ** (aberration) – спотворення зображень, що отримуються в оптичних системах (лінзах, фотоапаратах, мікроскопах тощо). Розрізняють *геометричну* і *хроматичну* А.о.с. *Геометрична* А.о.с. – спотворення зображень, що виникають унаслідок використання широких пучків світла (астигматизм, сферична аберация, кома, дисторсія). *Сферична* А.о.с. – різна заломлювальна здатність крайових і центральних ділянок лінзи – приводить до того, що при попаданні на лінзу широкого пучка світла на екрані виникає неточне зображення (пляма). Усувається ця погіршеність використанням системи із збиральною і розсіювальною лінзами з протилежною аберацией; лінзи підбирають з таким розрахунком, щоб їх сумарна оптична сила не дорівнювала нулю. *Хроматична* А.о.с. – спотворення зображення, обумовлене явищем дисперсії світла в лінзах оптичної системи при використанні білого світла: через дисперсію фокус червоних променів розташований від лінзи далі, ніж фокус фіолетових, тому зображення білої точки виходить або червоним з синьо-фіолетовим ореолом, або фіолетовим з жовто-червоним ореолом залежно від місцезнаходження екрана. Цей недолік усувається підбором системи, що складається з увігнутої і опуклої лінз, хроматична аберация у яких має протилежний характер. При підборі лінз зі скла з певними показниками заломлення і радіусами кривизни поверхонь можна значною мірою усунути хроматичну аберацию.

**АБСОРБЦІЯ** (absorption) – явище поглинання речовин з газів або рідин, що відбувається в усьому об'ємі рідкого або твердого тіла. На відміну від адсорбції А. відбувається в усьому об'ємі поглинача (абсорбенту).

**АВТОЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ** (field-emission) – це випускання електронів провідними твердими та рідкими тілами під дією зовнішнього електричного поля без попереднього збудження цих електронів, що властиво іншим видам електронної емісії. Суть явища полягає в тунелюванні електронів крізь потенціальний бар'єр на поверхні тіла. Таке тунелювання стає можливим за рахунок викривлення потенціального бар'єра під час прикладення зовнішнього поля. При цьому з'являється область простору назовні тіла, в якій електрон може існувати з тією ж енергією, яку він має, коли знаходиться в тілі. Таким чином, автоелектронна емісія зумовлена хвильовими властивостями електронів.

**АГРЕГАТНІ СТАНИ** (aggregate states) – стани однієї і тієї ж речовини, що відрізняються один від одного характером теплового руху молекул, силами міжмолекулярної взаємодії, структурою тіла. Основними агрегатними станами є: твердий (кристалічний), рідкий, газоподібний і плазма.

**АДСОРБЦІЯ** (adsorption) – явище покриття поверхні твердого тіла, що знаходиться в газі або рідині, шаром молекул газу (рідини), що затримуються на ньому молекулярними силами; залежить від величини поверхні, від природи газу і від властивостей твердого тіла.

**АЛЬФА-ЧАСТИНКА** ( $\alpha$ -particle) – позитивно заряджена компонента випромінювання, така, що випускається при радіоактивних розпадах ядер; слабо відхиляється магнітним і електричним полями. Заряд альфа-частинки дорівнює подвоєному елементарному заряду, маса в чотири рази перевершує масу атома водню, тобто дорівнює масі атома гелію. Природу альфа-частинок з'ясував Резерфорд, вимірявши відношення заряду частинки до її маси за відхиленням в електричному і магнітному полях.

**АМПЕР** (Amper) – сила струму, що не змінюється, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і дуже малої площі кругового перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликав би між цими провідниками на ділянці довжиною 1 м силу, рівну  $2 \cdot 10^{-7}$  Н.

**АМПЕРМЕТР** – прилад для вимірювання сили постійного і змінного струму в амперах. Розрізняють демонстраційні, лабораторні і щитові амперметри.

**АМПЛІТУДА КОЛИВАНЬ** – максимальний зсув від положення рівноваги величини, що коливається.

**АНАЛІЗ** рентгеноструктурний (X-ray analysis) – метод вивчення структури кристала по дифракційній картині за допомогою рентгенівських променів відомої довжини хвиль.

**АНІЗОТРОПІЯ** (anisotropy) – залежність фізичних властивостей від напрямлення всередині кристалічного тіла.

**АНІОНИ** (anion) – негативно заряджені іони. В електричному полі рухаються до позитивного електрода (анода).

**АНІГІЛЯЦІЯ** (annihilation) – явище, що полягає в тому, що при зіткненні частинки з її античастинкою можливе їх перетворення на кванти поля, відповідні виду взаємодії цих частинок: при анігіляції електрона з позитроном виникають кванти електромагнітного поля – фотони великої енергії.

**АНОД** (anode) – електрод, що приєднується до позитивного полюса джерела струму.

**АСТИГМАТИЗМ** (astigmatism) – спотворення зображень, що виникає при використанні світлових пучків, які складають значний кут з головною оптичною віссю (косі пучки). Астигматизм залишається навіть при використанні вузьких світлових пучків і зберігається в системах, звільнених від сферичної аберації. При астигматизмі навіть якнайкраще зображення точки, що не лежить на головній оптичній осі лінзи, є не точкою, а двома взаємно перпендикулярними лініями, що знаходяться в різних місцях. Ця погіршеність усувається використанням декількох лінз з різною кривизною і показниками заломлення.

**АТОМ** (atom) – найменша частинка хімічного елемента, яка ще є носієм його хімічних властивостей. Атом складається з ядра і електронів, що обертаються навколо нього по орбіталах електронів. Сумарний електричний заряд ядра і електронів дорівнює нулю.

**ВАКУУМ** (vacuum) – такий ступінь розрідження газу, при якому молекулярні зіткнення в посудині даного об'єму або зовсім відсутні, або ж є багатозначними в порівнянні з числом зіткнень молекул зі стінками посудини.

**ВИПРОМІНЮВАННЯ ІНДУКОВАНЕ** (emission) – випромінювання збуджених атомів під дією падаючого на них випромінювання. Особливістю цього виду випромінювання є те, що хвиля, яка виникає при індукованому випромінюванні, не відрізняється від хвилі, падаючої на атоми, ні частотою, ні фазою, ні поляризацією. В.і. спонтанне (мимовільне) – процес спонтанного випускання фотонів збудженими атомами. В.і. теплове – найбільш простий і поширений вид випромінювання, коли втрати енергії на випромінювання компенсуються за рахунок припливу тепла до випромінювального тіла.

**ВТОРИННА ЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ** (second electronic emission) – це випускання електронів поверхнею металів, напівпровідників чи діелектриків при бомбардуванні їх пучком електронів. Вторинний електронний потік складається з електронів, відбитих поверхнею (пружно чи непружно відбитих електронів), та «істинно» вторинних електронів – електронів, які відбиті з металу, напівпровідника чи діелектрика первинними електронами. Відношення числа вторинних електронів  $n_2$  до числа первинних  $n_1$ , які викликали емісію, називається коефіцієнтом вторинної електронної емісії:  $\delta = n_2 / n_1$ .

**ГАЗ ІДЕАЛЬНИЙ** (ideal gas) — достатньо розріджений газ, відстані між молекулами якого в багато раз перевищують їх розміри. Взаємодіють молекули тільки при зіткненнях.

**ГАЛЬМІВНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ** (braking radiation) – електромагнітне випромінювання заряджених частинок при зіткненні з іншими частинками.

**ДИСЛОКАЦІЇ** (dislocations) – дефекти кристалічних ґраток у вигляді ліній з порушенням правильного чергування атомних площин.

**ДИФРАКЦІЯ** світла (light diffraction) – явища, спостережувані при розповсюдженні світла в середовищі з різкими оптичними неоднорідностями (вузькі отвори, краї непрозорих тіл). У вужчому сенсі під дифракцією світла розуміють обгинання світлом малих перешкод, тобто відхилення від законів геометричної оптики. Дифракція спостерігається не тільки в діапазоні видимого світла, але і інших електромагнітних коливань, зокрема рентгенівських променів. Якщо направити вузький пучок рентгенівських променів на кристал, що відіграє роль дифракційної ґратки, відбудеться дифракція.

**ДИFUЗІЯ** (diffusion) – явище проникнення молекул однієї речовини в інші.

**ДІЕЛЕКТРИКИ** (isolator) – речовини які, практично не проводять електричний струм, оскільки в них дуже мало вільних заряджених частинок, які можуть переміщуватись по речовині. Д. неполярні – такі речовини, у

яких центри позитивних зарядів окремих атомів або молекул збігаються. Д. полярні – речовини, у яких центри позитивних і негативних зарядів окремих атомів і молекул не збігаються.

ДОВЖИНА хвилі (wave length) – відстань, на яку розповсюджуються коливання за один період, або відстань між навколишніми точками, що коливаються з однаковими фазами.

ДОВЖИНА шляху (trajectory) – довжина тієї лінії, уздовж якої відбувається рух.

ДОВЖИНА вільного пробігу (the mean free path) – середня довжина шляху, який проходить молекула між двома послідовними зіткненнями з сусідніми молекулами.

ДОЗА ОПРОМІНЕННЯ (dose irradiation) – величина радіоактивного випромінювання, вимірювана за ступенем іонізації атомів і молекул повітря.

ДОМЕНИ (domain) – області спонтанного намагнічення у феромагнетиках, які існують в результаті специфічної взаємодії електронів в атомах феромагнетика.

ДОНОРИ (donors) – структурні дефекти в кристалічній ґратці напівпровідників, що обумовлюють домішкову електронну провідність

ДУГА ЕЛЕКТРИЧНА (electric arc.) – стовп газу, що світиться, який виникає між електродами при їх розсуві. Завдяки виділенню великої кількості тепла з поверхні електродів відбувається термоелектронна емісія. Дуговий розряд – потужне джерело світла. Застосовується в прожекторах, проєкційних і кіноапаратах; отримав широке застосування при зварюванні металів.

ДІРКА (holes) – атом в кристалі напівпровідника з недістаючим електроном. Заряд дірки позитивний.

ЕКЗОЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ (ЕЕЕ) – випускання електронів холодною металевою поверхнею під час механічного впливу на неї та розтріскування. Одне з пояснень Е.е. полягає в тому, що енергія, необхідна для вильоту екзоелектрона з металу, звільнюється при переході атома зі слабо зв'язаного стану в більш сильно зв'язаний стан на поверхні. Е.е. використовується як показник радіаційних пошкоджень чи опроміненень, а також при вивченні розвитку тріщин в твердих тілах, особливо в міру того, як з'являється втома, а також для вивчення адсорбції і хімічних реакцій на поверхнях твердих тіл.

ЕКСПОЗИЦІЙНА ДОЗА (display dose) характеризує іонізуючу спроможність випромінювання в повітрі, вимірюється в кулонах на 1 кг (Кл/кг); позасистемна одиниця – рентген (Р); 1 Кл/кг –  $3,88 \cdot 10^3$  Р.

ЗАКОН ВІДІНГТОНА – описує витрати первинних електронів, які проникають в метал, на гальмування внаслідок кулонівських взаємодій з електронами провідності, під час істинної вторинної електронної емісії.

$$\varepsilon_x = (\varepsilon_0^2 - \alpha x)^2,$$

де  $\varepsilon_x$  – енергія первинних електронів, які пройшли шлях в матеріалі мішені,

$\varepsilon_0$  – енергія первинних електронів,

$\alpha$  – стала Віддінгтона.

**ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА** – кількість теплоти, що виділяється в провіднику при проходженні по ньому електричного струму, дорівнює добутку квадрата сили струму, опору провідника і часу:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

**ЗАКОН КУЛОНА** – сила взаємодії двох точкових нерухомих заряджених тіл у вакуумі прямо пропорційна квадрату відстані між ними:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності;

$q_1$  і  $q_2$  – нерухомі точкові заряди;

$r$  – відстань між зарядами.

**ЗАКОН РІЧАРДСОНА-ДЕШМОНА** – дає змогу визначити струм насичення під час термоелектронної емісії.

$$J_{\text{нас}} = AT^2 \exp(-e\phi/kT),$$

де  $J_{\text{нас}}$  – струм насичення,

$A$  – константа,

$T$  – температура,  $K$ ,

$e\phi$  – робота виходу.

**ЗАКОН збереження енергії** – повна механічна енергія замкнутої системи тіл залишається незмінною при будь-яких рухах тіл цієї системи. Закон збереження енергії означає, що зберігається сума всіх видів енергії системи.

**ІЗОТЕРМА (isotherm)** – лінія графічної залежності тиску даної маси газу від об'єму при постійній температурі.

**ІЗОТОПИ (isotope)** – різновиди хімічного елемента, в атомних ядрах якого міститься однакове число протонів, але різне число нейтронів.

**ІЗОХОРИ (isochors)** – лінії графічної залежності тиску даної маси газу від температури при постійному об'ємі.

**КОЛИВАННЯ (oscillation)** – рух, що повторюється, кожен цикл якого відтворює точно будь-який інший цикл. Розрізняють К.: акустичні – механічні коливання в межах від  $17 \text{ Гц}$  до  $20 \text{ кГц}$ , які приймаються людським вухом; вимушені – коливання, що здійснюються під дією зовнішньої періодичної сили; гармонічні – періодичні зміни кінематичних параметрів

(зміщення швидкості, прискорення) такі, що відбуваються за законом синуса або косинуса.

**КОЛЕКТОР (collector)** – автоматичний перемикач в генераторі постійного струму. Два півкільця, закріплені на осі генератора за допомогою ізолюючого циліндра. До півкілець притискаються пружинні пластини – струмознімальні щітки.

**КОЛІМАТОР (collimator)** – оптичний пристрій для отримання паралельного пучка променів. Є трубою, на одному кінці якої є ширма з вузькою щілиною, а на іншому – збиральна лінза. Застосовується в спектральних і вимірювальних оптичних приладах тощо.

**КІЛЬЦЯ НЬЮТОНА (Newton's Rings)** – окремий випадок інтерференції світла в тонких плівках. Темна пляма з сукупністю маленьких веселкових кілець навколо неї, одержуваних при накладенні лінзи з великою фокусною відстанню на плоску скляну пластинку. Відстань між кільцями зменшується у міру збільшення їх радіуса.

**КОНВЕКЦІЯ (convection)** – процес механічного переміщення нагрітих частин рідини або газу. Відбувається унаслідок зменшення щільності рідини або газу при підвищенні їх температури.

**КОНДЕНСАТОР ЕЛЕКТРИЧНИЙ (electrical capacitor)** – пристрій з двох провідників (обкладинок), розділених шаром діелектрика, товщина якого менша розмірів провідника.

**МАКРОСКОПІЧНИЙ АНАЛІЗ (macroscopic examination)** – це аналіз матеріалів, який полягає в дослідженні їх будови неозброєним оком або за допомогою невеликих збільшень (до 30 разів).

**МЕТОД КАНАЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ (electron channeling)** – метод дослідження об'єкта за допомогою ефекту каналювання електронних пучків в об'єкті.

**МЕТОД МІКРОДИФРАКЦІЇ (diffraction method)** – метод одержання дифракційної картини ділянок об'єкта (діаметром 1...2 мкм) для ідентифікації кристалічних фаз, визначення їх тонких структурних особливостей.

**МІКРОДИФРАКЦІЯ (microdiffraction)** – дифракційне зображення малої ділянки об'єкта, сформоване у задній фокальній площині об'єктивної лінзи, збільшене електронними лінзами.

**МІКРОСКОП ЕЛЕКТРОННИЙ (electron microscope)** – мікроскоп, який формує зображення об'єкта електронними пучками і засобами електронної оптики.

**МІКРОСКОП ПРОСВІТЛЮВАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ (transmission electron microscope)** – електронний мікроскоп, який формує зображення об'єкта пучками, що проходять через цей об'єкт.

**МІКРОСКОП ЕМІСІЙНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ (emission microscope)** – електронний мікроскоп, який формує зображення об'єкта за допомогою вторинного випромінювання, що утворилося при взаємодії пучка електронів і об'єкта.

**МІКРОСКОП АВТОЕЛЕКТРОННИЙ** (field-emission microscope) – електронний мікроскоп, який формує зображення електронним пучком, що випромінює об'єкт, під впливом потенціалу електричного поля.

**МІКРОСКОП ЕЛЕКТРОННИЙ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ** (ultrahigh voltage electron microscope) – просвітлювальний електронний мікроскоп з прискорювальною напругою понад 25 кВ.

**МІКРОСКОП РАСТРОВИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ** (scanning electron microscope) – електронний мікроскоп, який формує зображення об'єкта при скануванні його поверхні електронним зондом.

**МІКРОСКОПІЧНИЙ АНАЛІЗ** (microscopic testing) – це аналіз малих об'єктів (матеріалів) невидимих неозброєним оком, який полягає в дослідженні будови (мікроструктури) матеріалу за допомогою оптичного (при збільшенні від 50 до 1500 разів) або електронного (при збільшенні до 100 000 разів) мікроскопа.

**МІКРОСТРУКТУРА** (microstructure) – будова металу (сплаву) у вигляді зерен з певною формою або орієнтацією, або у вигляді однієї чи декількох фаз, що виявляється при збільшенні більше ніж у 30 разів.

**МІКРОШЛІФ** (microsection) – це невеликий зразок металу, що має особливим чином підготовлену поверхню для мікроаналізу.

**МОЛЕКУЛА** (molecule) – найменша стійка частинка даної речовини, яка має його хімічні властивості і складається з однакових або різних атомів, з'єднаних в одне ціле хімічними зв'язками.

**МОНОКРИСТАЛ** (monocrystal) – одиничний кристал.

**РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНИЙ МІКРОАНАЛІЗ** (X-ray microanalysis) – метод вивчення структури кристалу за дифракційною картиною за допомогою рентгенівських променів відомої довжини хвилі.

**РІДИНА** (liquid or fluid (штучна рідка суміш)) – агрегатний стан речовини, що відповідає проміжному між твердим і газоподібним станом. Випаровування Р. – процес подолання молекулами сили тяжіння решти молекул і виліт їх з рідини завдяки великій кінетичній енергії. Кипіння Р. – процес випаровування рідини, що відбувається не тільки з її поверхні, але і зі всього об'єму рідини усередині бульбашок пари, що утворюються при цьому. Кипіння починається при тій температурі, при якій тиск насичувальної пари в бульбашках порівнюється з тиском рідини.

**РІДИНА в'язка** (viscous fluid) – рідина, у якій враховуються сили тертя, що виникають при її русі.

**РІДИНА ідеальна** (perfect (ideal) liquid) – рідина абсолютно нестискувана і нев'язка. Поняття про таку рідину вводиться при виведенні основних законів гідродинаміки (закон Паскаля, рівняння Бернуллі).

**РІДИНА перегріта** – рідина, заздалегідь ретельно очищена і звільнена від газу; існує при температурі вище за температуру кипіння.

**РЕПЛІКА** (replica) – копія, зліпок з рельєфу досліджуваного об'єкта.



отримують відомості про властивості молекул, рідин, кристалів. Виникло від назви мінералу «флюорит».

**ФОТОЕЛЕКТРОННА ЕМІСІЯ** (зовнішній фотоэффект) – явище випускання електронів твердими тілами чи рідинами під впливом електромагнітного випромінювання у вакуумі чи іншому середовищі. Практичне значення має Ф.е. з твердих тіл у вакуум.

**ФРАКТОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ** (fatigue examination) – це аналіз зломів матеріалів. Фрактографія є основним джерелом інформації про причини та характер руйнування деталей.

**ХВИЛЯ** (wave) – процес розповсюдження коливання в пружному середовищі з часом. Хвилі бувають: рухомі – хвилі, всі точки яких здійснюють коливання з однаковою амплітудою, але з різними фазами; звукові – механічні хвилі з частотою коливань частинок середовища від 20 Гц до 20 кГц; когерентні – хвилі, джерела яких мають однакову частоту, а фази коливань збігаються або відрізняються на деяку постійну не залежну від часу величину; механічні – хвилі, що виникають завдяки силам пружності, які здійснюють зв'язок між окремими частинками тіла; монохроматичні – електромагнітні хвилі, коливання в яких відбуваються із строго постійною частотою; поперечні – коливання кожної точки середовища, що відбуваються перпендикулярно до напрямку розповсюдження хвилі; подовжні – коливання кожної точки середовища відбуваються у подовж напрямку розповсюдження хвилі; стоячі – випадок інтерференції когерентних хвиль, що йдуть назустріч одна одній. Ця їх властивість використовується для отримання ультразвукових хвиль великої інтенсивності; електромагнітні – розповсюджуються в просторі електромагнітного поля. Електромагнітні хвилі є поперечними.

**ХРОМАТИЧНА АБЕРАЦІЯ** (chromatic (color) aberration) – виникає через різну швидкість (тобто довжини хвилі) електронів і зміни її в часі, що призводить до зміни фокусних відстаней лінз. Хроматичну аберацію зменшують шляхом стабілізації напруги, що прискорює електрони, і електричного струму в лінзах.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Башенко В. В. Электронно-лучевые установки. / Башенко В. В. – Л. : Машиностроение, 1972. – 168 с.
2. Вредные вещества промышленности. / Под общ. ред. В. В. Лазарева. – М. : Химия, 1983. – 456 с.
3. ДСТУ 7237:2011. Система стандартів безпеки праці. Електробезпека. – К. : Держспоживстандарт, 2011. – 34 с.
4. Давыдов Б. И. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. / Давыдов Б. И., Тихончук В. С., Антонов В. В. – М. : Энергоатомиздат – 1984. – 244 с.
5. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. / С. Дэшман. Пер. с англ. под ред. М. И. Меньшикова. 2-е изд. – М. : Мир, 1964. – 715 с.
6. Жигарев А. А. Электронная оптика и электроннолучевые приборы. Ученик для вузов. / Жигарев А. А. – М. : Высшая школа, 1972. – 540 с.
7. Завьялов М. А. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. / Завьялов М. А., Крендель Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 345 с.
8. Королев Б. И. Основы вакуумной техники / Королев И. Б. – М. : Энергия. 1975.
9. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов : [Справочник] / Н. Н. Рыкалин, А. А. Улов, И. В. Зуев, А. Н. Кокора. – М. : Машиностроение, 1985. – 496 с.
10. Манойлов В. Е. Электричество и человек. / Манойлов В. Е. – Л. : Энергоатомиздат, 1988.
11. Оборудование для электронно-лучевой сварки / [Чвертко А. И., Назаренко О. К., Святский А. М. и др.] – Киев : Наукова думка, 1983. – 408 с.
12. Павлова С. П. Охорона праці в електронній промисловості. / Павлова С. П. – К. : Наукова думка, 1985.
13. Патент на корисну модель. Газорозрядна електронна гармата. Новиков А. О. Режим доступу : <http://patent.vntu.edu.ua/pdf/40535.pdf>
14. Техническая документация к установке «Булат-3Т».
15. Черненко В. С. Променеві методи обробки. [Навч. посібник.] / В. С. Черненко, М. В. Кіндрачук, О. І. Дудка. – К. : Кондор, 2004. – 166 с.
16. Шиллер З. Электронно-лучевая технология / Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
17. Электронно-лучевая сварка / Под ред. Б. Е. Патона – Киев. : Наукова думка, 1987.
18. Юфим И. Я. Техника безопасности при работах с полупроводниками. / Юфим И. Я. – М. : Машиностроение, 1998. – 200 с.
19. Режим доступу :  
[http://portal.tpu.ru/SHARED/e/EVDOKIMOV/Teach/course\\_at/Lectures/At\\_Phys\\_L1.pdf](http://portal.tpu.ru/SHARED/e/EVDOKIMOV/Teach/course_at/Lectures/At_Phys_L1.pdf)

*Навчальне видання*

**Архіпова Тетяна Федорівна**

# **ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**Лабораторний практикум**

Редактор В. Дружиніна  
Коректор З. Поліщук

Оригінал-макет підготовлено Т. Архіповою

Підписано до друку 02.10.2017 р.  
Формат 29,7x42¼ . Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Ум. друк. арк. 4,79. Зам. № 2017-360.  
Наклад 50 (1-й запуск 1–20) пр.

Видавець та виготовлювач  
інформаційний редакційно-видавничий центр.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, 21021.  
Тел. (0432) 59-85-32, 59-87-38.  
**press.vntu.edu.ua**  
*E-mail:* [kivc.vntu@gmail.com](mailto:kivc.vntu@gmail.com).  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.