

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра медичної радіофізики

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри медичної радіофізики
від _____ 2024 року, протокол № _____.
Завідувач кафедри кандидат фіз.-мат. наук, доцент
_____ Сергій РАДЧЕНКО

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

«ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОДНОЇ
ПЛАЗМИ ЗНИЖЕНОГО ТИСКУ»

Виконала:

студентка 2-го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали
ОНП Біомедична фізика, інженерія та інформатика
Гончарук Каріна Костянтинівна _____

Науковий керівник:

канд. фіз.-мат. наук, доцент
Веремій Юлія Петрівна _____

Рецензент:

доктор фіз.-мат. наук, доцент
Момот Андрій Іванович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань
Студент _____ Каріна ГОНЧАРУК

Київ-2024

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ВСТУП	4
1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	6
1.1. Основні фактори, які впливають на активізацію насіння.....	6
1.1.1 Скарифікація насіннєвої оболонки	6
1.1.2. Інактивація патогенів, що передаються насінням.....	9
1.1.3.Підвищення ефективності механізмів антиоксидантних захисту ...	11
1.2. Фізико-хімічні аспекти взаємодії низькотемпературної плазми з насінням	13
1.3. Радіочастотний розряд	15
2. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	17
2.1. Опис експериментальної установки	17
2.2. Визначення температури заселення збуджених електронних рівнів розряду на основі атомних спектрів	22
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	25
3.1. Попередня обробка та аналіз спектрів.....	25
3.2. Визначення температури заселення збуджених електронних рівнів розряду за атомарними лініями кисню	29
3.3. Визначення температури заселення збуджених коливальних рівнів розряду за молекулярними смугами азоту	32
3.4. Визначення температури заселення збуджених обертальних рівнів за допомогою молекулярних ліній азоту	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	40

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота вміщує 42 стор., 20 рис., 6 табл..

НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНА ПЛАЗМА, СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ, ТЕМПЕРАТУРА ЗАСЕЛЕННЯ.

Кваліфікаційна робота зосереджена на детальному дослідженні радіочастотного розряду та впливу низькотемпературної плазми пониженого тиску, яка застосовується в агропромисловості. У роботі розглянуто ряд літературних джерел, що висвітлюють вплив плазми на активацію сільськогосподарського насінневого матеріалу та її взаємодію з поверхнею насіння. Подано детальний опис використаної експериментальної апаратури та основних етапів проведення експериментів. Методи дослідження охоплюють техніки аналізу плазмових характеристик і визначення температурних параметрів. Представлені результати експериментів включають детальну оцінку температур заселення електронних, коливальних та обертальних рівнів, виміряних за допомогою спектрального аналізу кисню та азоту.

ВСТУП

В сучасних умовах агропромислового виробництва одним з ключових завдань є підвищення якості посівного матеріалу, яке безпосередньо впливає на врожайність та якість сільськогосподарської продукції. Стадії проростання насіння та раннього росту розсади є вкрай чутливими до змін у зовнішніх умовах, включаючи температурні коливання, вологість і наявність хвороботворних організмів. Від того, наскільки успішно рослина переживе ці критичні фази, залежить стан здоров'я рослини та потенціал врожайності.

Традиційно для стимуляції росту та захисту від шкідників використовувалися хімічні обробки, що включають синтетичні пестициди та інші агрохімікати. Однак ці методи можуть негативно впливати на екологію та здоров'я людини, внаслідок чого з'являється потреба в розробці екологічно безпечних та ефективних технологій обробки насіння.

Одним з інноваційних методів, що здобуває популярність, є застосування низькотемпературної плазми зниженого тиску. Плазмові технології пропонують великі можливості для безпечного стимулювання росту насіння та зменшення впливу патогенів без використання шкідливих хімікатів. Вони впливають на біологічні мембрани насіння, поліпшують їх проникність та активізують обмін речовин всередині насіння, що сприяє кращому проростанню та витривалості розсади.

Дослідження плазми важливі для розуміння процесів впливу, вони включають вимірювання таких параметрів, як електронна температура, щільність плазми, хімічний склад і динаміку реактивних частинок. Ці параметри мають вирішальне значення для оптимізації умов обробки та досягнення максимального ефекту від плазмової обробки насіння. Знання характеристик плазми дозволяє контролювати і модифікувати поверхні

насіння на молекулярному рівні, що сприяє кращій адгезії води, підвищенню стійкості до захворювань та підвищенню врожайності.

Ця дипломна робота присвячена дослідженню механізмів впливу низькотемпературної плазми на посівний матеріал, аналізу компонентів плазми та їхньої ролі у взаємодії з насінням. Особлива увага приділяється розгляду ефективності плазмових обробок і можливостей їх використання для забезпечення екологічно чистих та високопродуктивних агротехнологій. Метою дослідження є створення методик для розрахунку температур для вимірювання електронних, коливальних і обертальних збуджених рівнів для різних компонент плазмоутворюючого газу.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Основні фактори, які впливають на активізацію насіння

1.1.1 Скарифікація насінневої оболонки

Швидкість проростання насіння залежить від товщини й проникності насінневої оболонки. Зокрема, насіння з товстими оболонками повільно поглинає воду без скарифікації. Наприклад, бобові, як дика соя, мають значно потовщені та непроникні насінневі оболонки. У сої високе співвідношення маси оболонки до маси ембріона (понад 0,1) свідчить про непроникність оболонки [1]. Тому часто потрібна скарифікація для активації насіння та успішного укорінення розсади.

Радіочастотний розряд у камері з контрольованою температурою є ефективним для стимуляції насіння залежно від виду культури, часу впливу та потужності. Так, РЧ-розряд у повітрі збільшив активність насіння пшениці, кукурудзи та машу [2][3]. Вплив радіочастотного розряду в гелії збільшив проростання сої та ріпаку на 9% та 7% відповідно, при інтенсивності потужності від 80 до 100 Вт та часі впливу 0,25 хв [4][5]. Проте вплив радіочастотного розряду на основі гелію з інтенсивністю потужності нижче 60 Вт не показав значного ефекту на проростання сої, що може бути пов'язано з товстою та непроникною оболонкою її насіння.

У таблиці 1 представлено результати скарифікації плазмової обробки насіння з різними параметрами, такими як потужність (Вт) і час впливу (хвилини), за різних культур [6].

Таблиця 1. Вплив плазмової обробки на скарифікацію насінневої оболонки за допомогою радіочастотного розряду

Умови впливу				ROS/RNS	Культура	Ефект
Цільовий етап	Середовище	Потужність (W)	Час впливу (min)			
Сухе зерно	повітря	20	0-2	-	Пшениця	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання
		50, 100	0-20	Збуджений N2	Пшениця	Збільшення відсотку схожості
		77-147	0-10	Збуджений N2 NO, OH	Пшениця Кукурудза	Збільшення відсотку схожості Збільшення розміру плодів
		40, 60	0-20	-	Маш	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання Зменшення часу до проростання
		20	0,2	-	Квасоля	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання
Сухе зерно	Гелій	60-120	0, 0,25	-	Соя	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання Зменшення часу до проростання

		100		-	Ріпак	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання Зменшення часу до проростання
Сухе зерно	C6H5NH2, C6H12	150	0-20	-	Кукурудза Соя	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання
Сухе зерно	N2H4	150	0-20	-	Кукурудза	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання
Сухе зерно	CF4	150	0, 5	-	Редька Горох	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання
Сухе зерно	ODFD	150	0-20	-	Кукурудза Соя Квасоля	Збільшення відсотку схожості Зменшення часу до проростання

Результати демонструють, що плазмова обробка може підвищити здатність насіння поглинати воду, що сприяє кращому укоріненню в ґрунті. Позитивний вплив плазмової обробки на активацію насіння головним чином залежить від потужності та тривалості впливу. Наприклад, обробка насіння плазмою з потужністю 100 Вт протягом 10 хвилин може покращити живлення рослин без шкоди для насіння, викликаної плазмою. Оптимальні параметри для плазмової обробки слід визначати індивідуально для кожного виду культури.

1.1.2. Інактивація патогенів, що передаються насінням

Загалом, стадії проростання насіння та раннього росту розсади є найбільш вразливими до інфекцій, спричинених бактеріями та грибками, у процесі вирощування сільськогосподарських культур. Інактивація збудників хвороб за допомогою плазмової обробки є ефективним методом запобігання розвитку захворювань у посівах. Ключовими факторами для успішної інактивації патогенів, що передаються насінням, є потужність та час впливу, параметри яких визначаються на основі специфічних досліджень (див. таблиця 2) [6].

Інфекційні агенти, що передаються насінням, можуть істотно знижувати проростання насіння та приживлюваність сіянців. Однак, радіочастотний розряд має потенціал для інактивації цих патогенів. Види *Alternaria* та *Fusarium*, які є переносниками захворювань у різноманітних культурах, включаючи зернові, бобові та овочеві культури, можуть бути ефективно контрольовані за допомогою цієї технології. Наприклад, обробка радіочастотною плазмою при потужності 77 Вт протягом 8 хвилин у вакуумній камері зменшила зараження грибками *Alternaria* та *Fusarium* на 71% та 99% в кукурудзі та пшениці відповідно [4]. Також, при потужності 80 Вт і експозиції 0,25 хвилини радіочастотний розряд у вакуумі здатний інактивувати бактеріальний патоген *Ralstonia solanacearum* [5].

Таблиця 2. Вплив інактивації патогенів, що передаються насінням, через плазмову обробку радіочастотним розрядом для профілактики захворювань рослин

Умови впливу				ROS/RNS	Культура	Ефект	Максимальний контроль інфекції(%)
Цільовий етап	Середовище	Потужність (W)	Час впливу (min)				
Сухе зерно	повітря	77-147	0-10	Збуджений N2 NO, OH	Кукурудза Пшениця	Інактивація грибків (Alternaria spp., Fusarium spp.)	Кукурудза: 71 Пшениця: 99
	Гелій	80	0, 0.25		Помідор	Інактивація бактерій (Ralstonia solanacearum)	25

Таким чином, плазмова обробка насіння може стати ключовим інструментом у профілактиці захворювань у широкому спектрі агрокультур, залежно від параметрів обробки та умов довкілля.

1.1.3. Підвищення ефективності механізмів антиоксидантних захисту

Рослини обладнані добре розвинутими механізмами антиоксидантного захисту, які забезпечують захист клітин від окисного пошкодження, нейтралізуючи внутрішньоклітинні активні форми кисню (ROS). Антиоксидантні системи рослин містять неферментативні компоненти, такі як поліфеноли та кверцетин, а також ферментативні компоненти, включно з каталазою (CAT), супероксиддисмутазою (SOD) та пероксидазою (POD). Ці ферменти спільно працюють у різних клітинних компартментах для захисту від надлишку ROS: SOD каталізує перетворення супероксидного радикалу в перекис водню і кисень, тоді як CAT і POD перетворюють перекис водню на воду. Неферментативні антиоксиданти також відіграють важливу роль у детоксикації активних форм кисню. Новітні дослідження виявили, що плазмова обробка може підсилити ефективність цих антиоксидантних систем у різних культурах рослин (див. таблицю 3) [14].

Таблиця 3. Зростання ефективності антиоксидантних захисних механізмів через вплив радіочастотного розряду

Умови впливу				ROS/RN S & UV	Культура	Ефект	Підвищена активність ферменту (%)
Цільовий етап	Середовище	Потужність (W)	Час впливу (min)				
Сухе зерно	Не	80	0, 0.25	-	Помідор	Підвищена активність антиоксидантного ферменту (POD)	100 (POD)
		10	0, 0.25	-	Ріпак	Підвищена активність антиоксидантного ферменту (CAT, SOD)	25 (SOD), 14 (CAT)

Плазмова обробка з низькою потужністю та короткою тривалістю експозиції показала ефективність у підсиленні клітинних антиоксидантних систем. Зокрема, радіочастотний розряд з потужністю 80-100 Вт та часом впливу 0,25 хвилини значно підвищив активність пероксидази у розсаді томатів та каталази та супероксиддисмутази у розсаді олійного ріпаку у порівнянні з контрольною групою [6][8].

1.2. Фізико-хімічні аспекти взаємодії низькотемпературної плазми з насінням

Плазмова обробка насіння відкриває нові перспективи для покращення їх проростання та збільшення витривалості розсади. Взаємодія низькотемпературної плазми з поверхнею насіння охоплює ряд фізико-хімічних процесів, що значно впливають на біологічні властивості посівного матеріалу. Крім того, плазмові пристрої можуть створювати різні фактори, такі як стерилізація насіння, тепло, ультрафіолетове опромінення, іонізація та електромагнітні поля, які також впливають на проростання насіння. Детальніше про ці фактори зображено на рисунку 1.

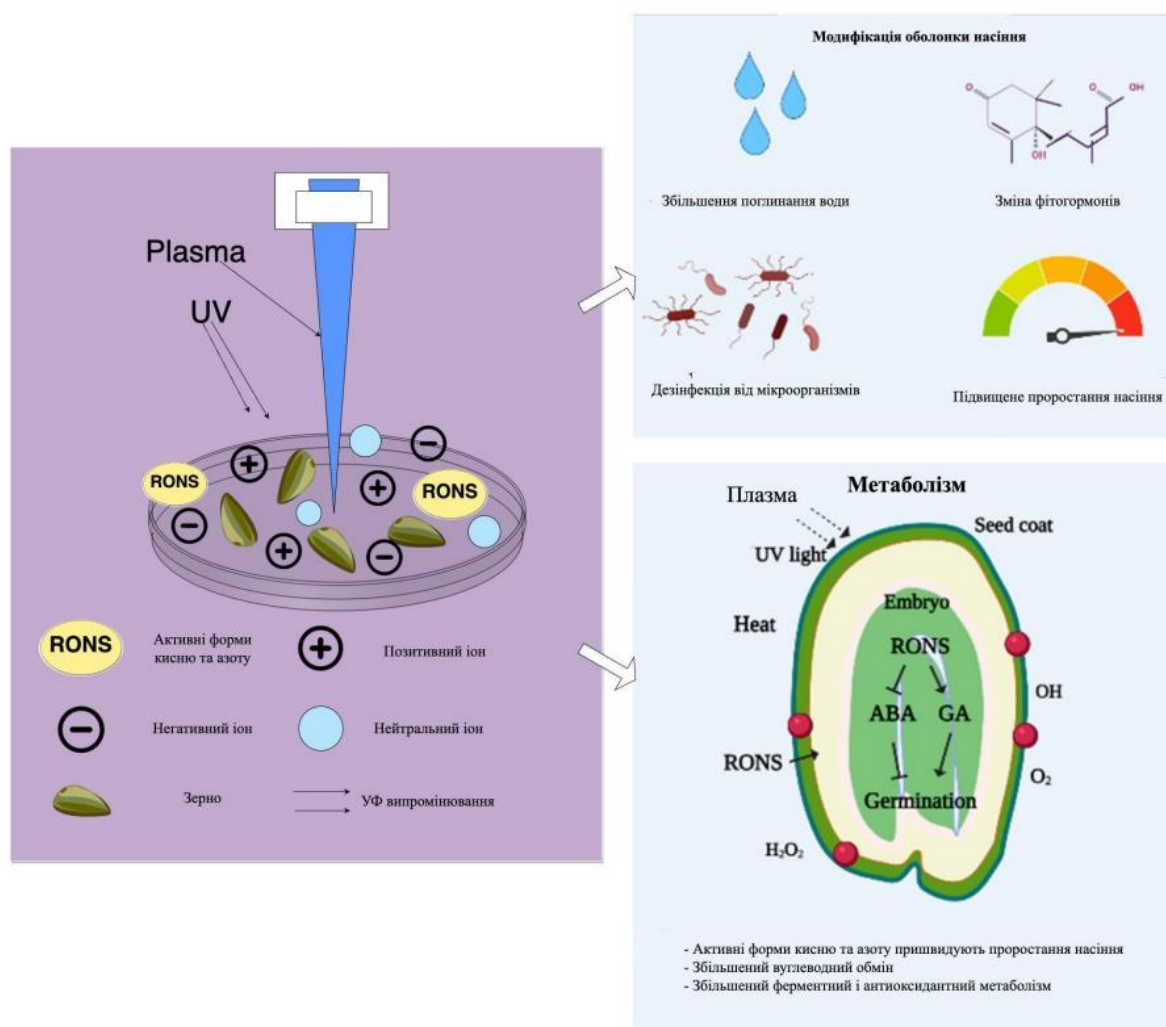


Рис 1. Огляд впливу обробки плазмою на проростання насіння та ріст рослин.

Процес плазмової обробки заснований на генерації активних частинок, таких як електрони, іони, атоми та радикали. Ці частинки взаємодіють з поверхнею насіння, що призводить до зміни їх фізико-хімічного стану. Зокрема, така обробка може сприяти скарифікації насінневої оболонки, тобто зменшенню її товщини та підвищенню проникності. Це поліпшує вбирання води насінням, що є критично важливим для активації метаболічних процесів усередині насіння на стадії проростання.

Під впливом плазми на поверхні насіння утворюються нові функціональні групи, що можуть впливати на хімічний склад насіння і стимулювати біологічні процеси. Окрім того, плазма може індукувати утворення нових мікро та наноструктур на поверхні насіння, що збільшує їх адгезію до ґрунту і захищає від зовнішніх стресів.

Також, реактивні види кисню та азоту (ROS та RNS), які утворюються під час плазмової обробки, сприяють окислювальним реакціям, які можуть мати антимікробний ефект, знижуючи ризик зараження насіння патогенами. Ці активні форми впливають не лише на поверхню насіння, але й проникають усередину, забезпечуючи додатковий захист від внутрішніх інфекцій.

Отже, фізико-хімічні аспекти взаємодії плазми з насінням відіграють ключову роль у підвищенні ефективності агротехнологій, пропонуючи екологічно безпечний та ефективний спосіб обробки посівного матеріалу, що сприяє поліпшенню їх проростання та здоров'я рослин.

1.3. Радіочастотний розряд

Радіочастотний розряд виникає, коли газ знаходиться під впливом коливального електромагнітного поля, яке генерується індукційною котушкою навколо реактора (індуктивний розряд) або за допомогою окремих електродів на зовнішній поверхні реактора (ємнісний розряд). Ці індуктивні та ємнісні розряди вже давно застосовуються для обробки газу та поверхонь [9]. Перші дослідження щодо використання цієї техніки для знищення мікроорганізмів запропонував Менаші (1968) [10], який розробив реактор, де імпульсний РЧ-розряд утворює аргонову плазму, що застосовується для стерилізації флаконів, забруднених спорами бактерій. При цьому зменшення кількості спор до 10^6 відбувалося за менше ніж 1 секунду. Проте, у цьому першому прототипі потрібна була висока енергія для генерації плазми, і Піплз та Андерсон (1985) [11] припустили, що це може бути пов'язано з механізмом мікроспалення. Для поліпшення використання РЧ-плазми, Буше (1985) [12] досліджував вплив типу газу та потужності розряду на ефективність обробки. Він виявив, що РЧ-плазма CO_2 ефективніша за аргонову РЧ-плазму, і що є пряма кореляція між переданою енергією плазмі та її руйнівною активністю проти мікроорганізмів. Сучасна комерційно доступна система STERRAD100 вводить пари H_2O_2 у реактор, де створюється вакуум, і РЧ-розряди, генеровані на другому етапі, стерилізують матеріал, який знаходиться в реакторі. Радіочастотна плазма може швидко впливати, але чутлива до умов експлуатації. Ефективність обробки залежить від використовуваного газу та потужності розряду. Детальний аналіз показав, що короткоживучі реактивні хімічні речовини, утворені в розрядах, є основним фактором знищення мікроорганізмів, тоді як ультрафіолетові або місцеві теплові ефекти мають лише другорядне або незначне значення [13]. Радіочастотна плазма вже доведена ефективна. Вона може застосовуватися з чутливими матеріалами,

такими як пляшки з поліетилентерефталату, та для знищення стійких форм мікроорганізмів, включаючи спори *Bacillus atrophaeus* і *Geobacterium stearothermophilus*. Останні розробки включають її використання для стерилізації медичних пристроїв та модифікації структури полімерів для запобігання бактеріального зчеплення [14].

Радіочастотний розряд (РЧ) виявляється ефективним для використання, коли критично важливо уникнути забруднень, що можуть виникнути через прямий контакт між плазмою та електродами. Плазмогенерація у РЧ розрядах демонструється на рисунку 2.

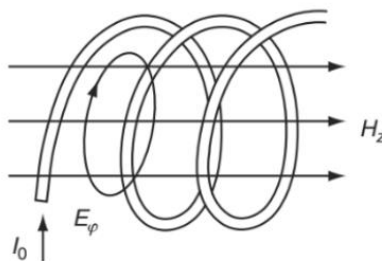


Рис. 2. Генерація індуктивно зв'язаної плазми.

Високочастотний електричний струм проходить через соленоїдну котушку, створюючи аксіальне магнітне поле, яке, у свою чергу, індукує вихрове електричне поле, що підтримує розряд. Магнітне поле залежить від струму в котушці, тоді як електричне поле, відповідно до рівнянь Максвелла, пропорційне частоті. Зазвичай для досягнення достатніх рівнів електричних полів необхідна радіочастота від 0,1 до 100 МГц. Для забезпечення стабільності теплової плазми у газі в середину соленоїдної котушки зазвичай вставляють діелектричну трубку. Щоб уникнути перешкод для систем радіозв'язку, промислові РЧ-розряди функціонують на спеціально призначених частотах, зокрема на частоті 13,6 МГц (довжина хвилі 22 м).

2. МЕТОДОЛОГІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Опис експериментальної установки

Експериментальна установка, яка використовується для досліджень, складається з двох основних компонентів: системи генерації плазми та спектрометричного обладнання.

Система для вироблення плазми зображена на рисунку 3 і складається з системи електродів для генерування плазми, залізна ємність - це зовнішній електрод, який заземлений. Всередині – це електрод до якого підводиться напруга, що змінюється з частотою камери обробки. Система здатна знижувати тиск за допомогою насоса, що дозволяє проводити виміри при тисках 50 Па та 100 Па. На цій установці встановлюється радіочастотний розряд, який має такі характеристики: струм 400 мА - 600 мА, напруга 1200 В. Температура транзисторів у процесі може досягати приблизно 60°C. Частота плазмового розряду регулюється в діапазоні від 20 кГц до 90 кГц.



Рис. 3. Установка для генерації плазмового розряду

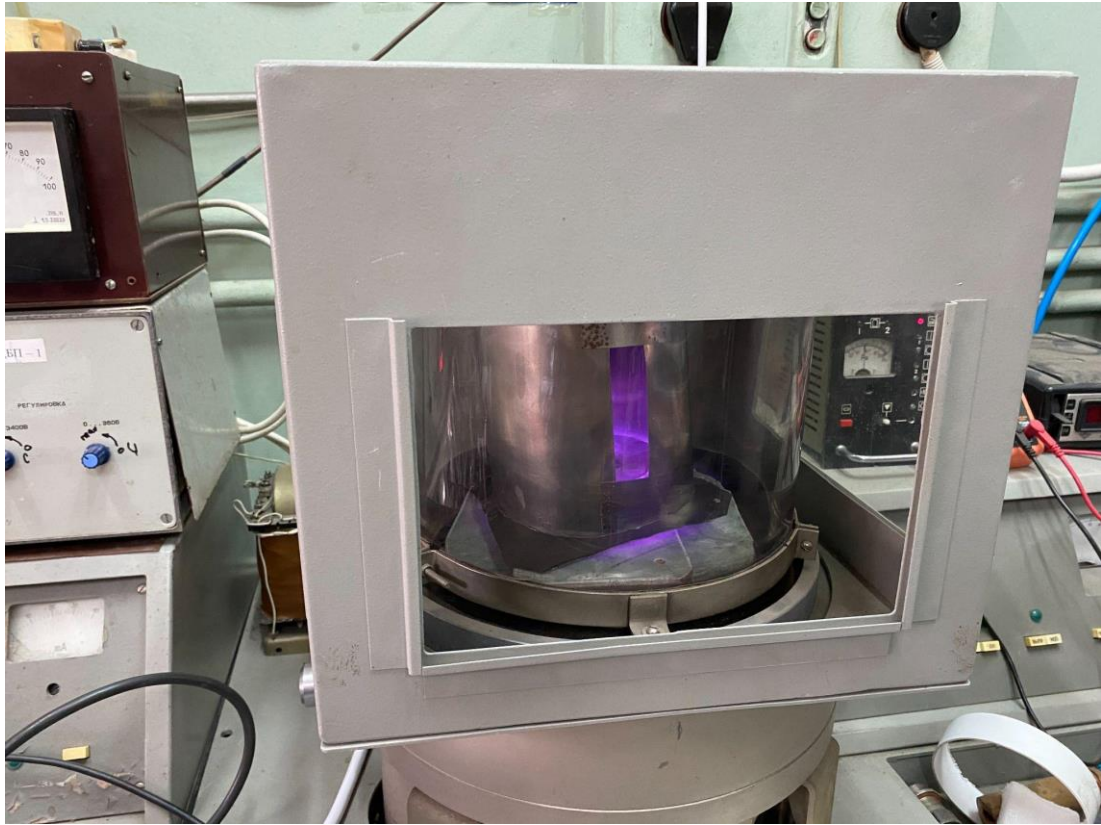


Рис. 4. Генерація плазмового радіочастотного розряду

Спектрометр, який використовується у цій установці, є компактним двоканальним аналізатором спектру. Цей пристрій сконструйований з двох спектрографів, розташованих у спільному корпусі, кожен з яких має відносний отвір $1/8$ та фокусну відстань 150 мм. Світло від джерела випромінювання подається до спектрометра через світловоди, які можуть бути як одноканальними, так і двоканальним (один вхід і два виходи). Для інтеграції спектрометра з джерелом випромінювання, зображеним на Рисунку 5, необхідно підключити його до USB-порту комп'ютера і запустити програму PSI-Line для керування.



Рис. 5. Підключення спектрометра до джерела світлового випромінювання

Оптична схема спектрометра представлена на Рисунку 6. Спектрографи містять вхідні щілини (2), дзеркала (3), дифракційні ґратки (4) і поворотні дзеркала (5). Індокси «1» і «2» на схемі означають приналежність елементів до першого або другого спектрографа.

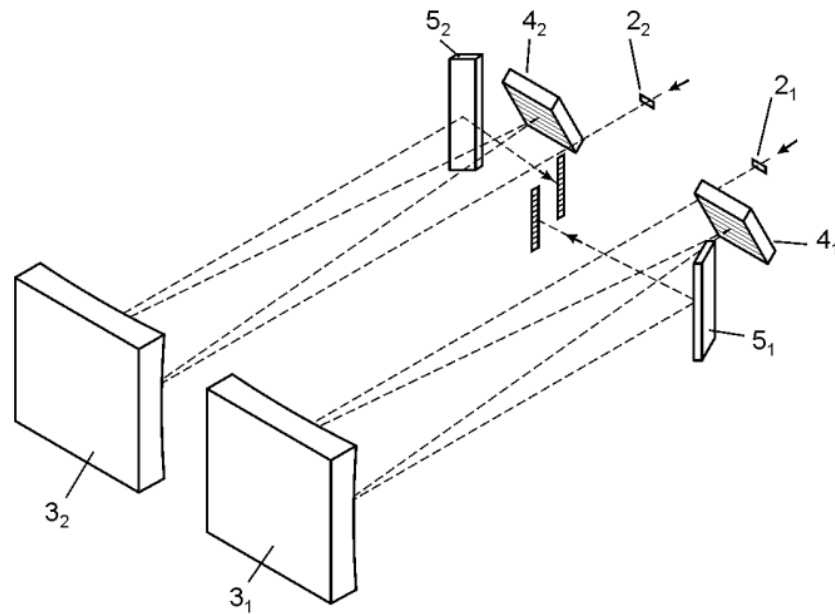


Рис. 5. Оптична схема спектрометра

Після того, як світлове випромінювання проходить через вхідну щілину (2), воно поступає з виходу світловода, який закріплений у тримачі (1). Далі світло направляється коліматорним сферичним дзеркалом (3), що фокусує його в паралельний пучок. Цей пучок подається на дифракційну ґратку (4), яка відіграє ключову роль у спектральному аналізі.

Дифракційна ґратка (4) має властивість відхиляти промені на різні кути залежно від довжини хвилі випромінювання, ефективно перетворюючи єдиний паралельний пучок на множину монохроматичних паралельних пучків. Ці пучки тоді проходять через камерне сферичне дзеркало (3) і поворотне дзеркало (5), які спільно фокусують випромінювання на фокальній площині (6). На цій площині формується сукупність монохроматичних зображень вхідної щілини, які разом створюють спектр, що охоплює певний інтервал довжин хвиль. Ця фокальна площина збігається з площиною світлочутливого елемента ПЗЗ-лінійки, що дозволяє точно реєструвати спектри обох каналів.

Для забезпечення точності та стабільності позиціонування дифракційної ґратки використовується юстувальний вузол (7), що дозволяє

фіксувати її положення з високою точністю. Плата реєструючої системи (8), що вбудована між спектрографами, виконує роль фізичного роздільника між оптичними схемами кожного з спектрографів. Це допомагає уникнути оптичних перешкод і взаємних впливів між каналами, забезпечуючи чіткість та надійність спектрального аналізу.

2.2. Визначення температури заселення збуджених електронних рівнів розряду на основі атомних спектрів

Під час горіння розряду між металевими або вугільними електродами відбувається випаровування матеріалу електродів. Електричний розряд збуджує атоми та молекули, що викликає світіння при проходженні розряду крізь газу в інтервалі між електродами.

Збудження атомів у розряді відбувається за рахунок енергії електронів, що визначається температурою електронів T_e . При атмосферному тиску, де спостерігається рівноважний розподіл енергії між частинками плазми, припускається, що $T_e = T_{ат}$. У умовах термодинамічної рівноваги розподіл атомів та молекул за енергетичними рівнями визначається за формулою Больцмана:

$$N_e = N_0 \frac{g_e}{g_0} e^{-\frac{E_e}{kT}} \quad (1)$$

де N_0 — кількість нейтральних атомів в 1 см^3 , N_e — кількість атомів у збудженому стані;

g_e і g_0 — статистичні ваги збудженого і нормального станів; E_e — енергія збудження верхнього стану; T — температура розряду; k — стала Больцмана.

Атоми з енергією E_e самостійно переходять в нормальний або проміжний стан, при цьому кожен атом випромінює світловий квант частоти ν . Інтенсивність випромінювання задається виразом:

$$I = N_e A_{ei} h\nu_{ei} \quad (2)$$

де A_{ei} — ймовірність оптичного переходу.

Підставляючи значення N_e з виразу за формулою Больцмана, отримуємо загальний вираз для інтенсивності випромінювання:

$$I = N_0 \frac{g_e}{g_0} e^{-\frac{E_e}{kT}} A_{ei} h\nu_{ei} \quad (3)$$

Цей вираз показує, що інтенсивність спектральної лінії у плазмі розряду безпосередньо залежить від температури розряду. Тому, вимірявши інтенсивність випромінювання в абсолютних одиницях, можна визначити температуру плазми розряду. Інші константи, а також ймовірності переходів A_{ei} , наразі виміряні або обчислені для багатьох елементів періодичної таблиці.

Однак, вимірювання точних абсолютних значень інтенсивностей має значні експериментальні труднощі. Крім того, в багатьох випадках відомі лише відносні значення ймовірностей переходів. Враховуючи це, Орнштейн розробив спектроскопічний метод визначення температури, заснований на вимірюванні відносних інтенсивностей спектральних ліній обертальної структури молекулярних смуг або атомних емісійних ліній.

Необхідною умовою для вимірювання температури зазначеним методом є правильний вибір спектральних ліній або смуг, вільних від самопоглинання в умовах експерименту.

Після логарифмування отриманого виразу для інтенсивності отримуємо рівняння прямої:

$$\frac{\lg I}{P_{ei}} = a - b \frac{E_e}{T}, \quad (4)$$

де b — постійна складова;

$$P_{ei} = \frac{g_e}{g_0} A_{ei} h\nu_{ei} \quad (5)$$

i

$$b = \frac{lgq_e}{k} = 5040, \quad (6)$$

де E_e — енергія збудженого стану атома, виражена в електрон-вольтах, а q_e — заряд електрона.

Тангенс кута нахилу прямої

$$\frac{lgI}{P_{ei}} = f(E_e) \quad (7)$$

до осі абсцис визначає температуру розряду.

Цей метод використовується для того, щоб визначити температуру заселення електронних збуджених рівнів відповідно визначити температуру електронів в газовому розряді.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Попередня обробка та аналіз спектрів

На експериментальному обладнанні було проведено вимірювання спектрів за наступними параметрами: тиск змінювався від $P=50\text{Pa}$ до $P=100\text{Pa}$, частота від $f=20\text{kHz}$ до $f=90\text{kHz}$, та час експозиції складав від 1000 мс до 10000 мс. На Рисунку 7 представлено один з отриманих спектрів у необробленому вигляді з параметрами $P=50\text{Pa}$, $f=20\text{kHz}$, та часом експозиції 3000 мс.

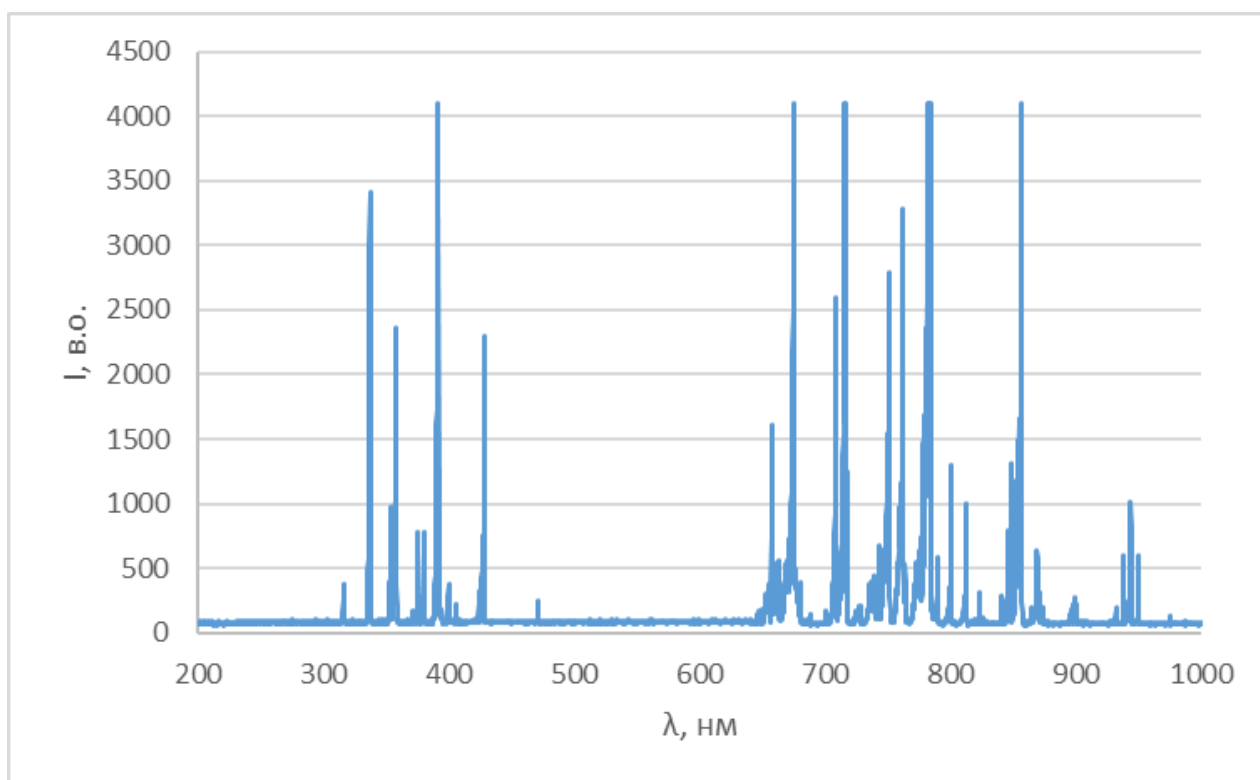


Рис 7. Виміряний спектр без попередньої обробки

Основний етап обробки включає в себе ідентифікацію і видалення фонові складові з виміряного спектру. Результат цього процесу демонструється на Рисунку 8.

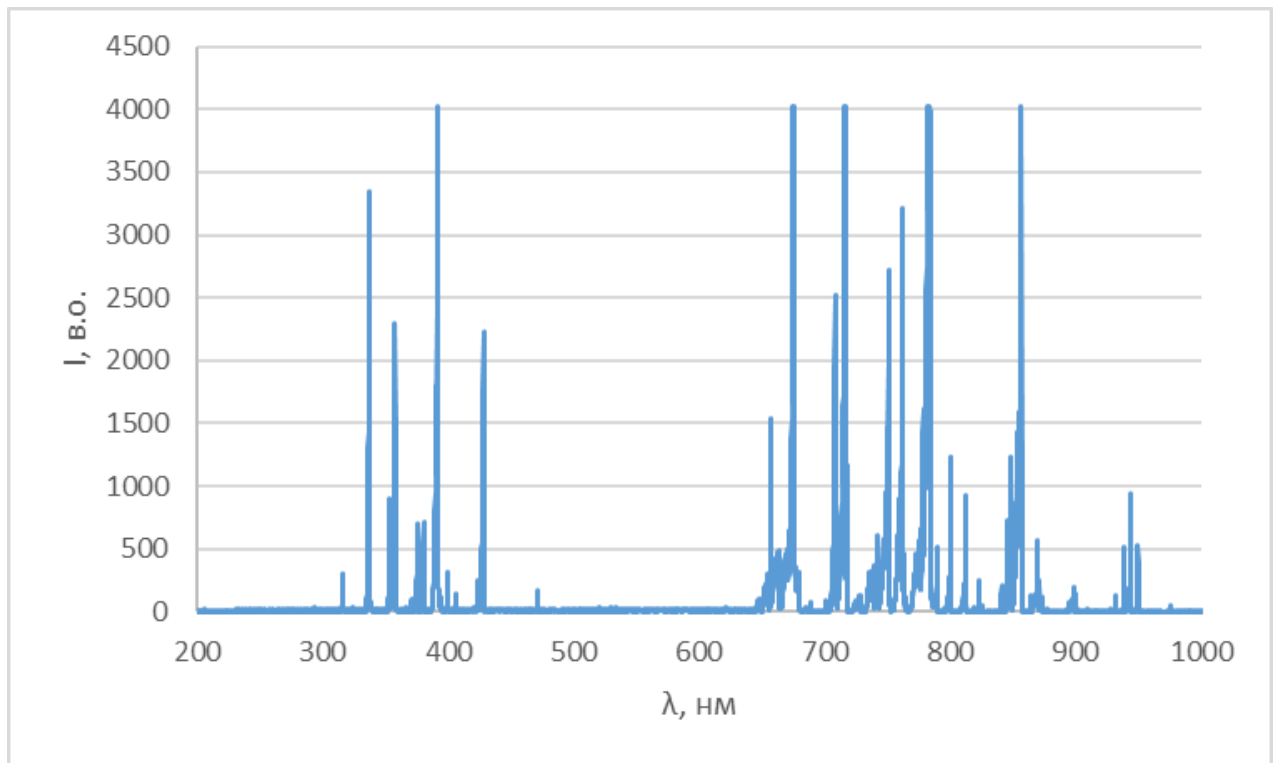


Рис. 8. Спектр без фонові складові

Далі було здійснено аналіз спектральної чутливості та її впливу на результати вимірювань. Спектральна чутливість була визначена в ході попередніх досліджень з використанням еталонного джерела випромінювання. Дані, отримані в результаті, представлені на Рисунку 9. Оброблений спектр з урахуванням чутливості зображений на Рисунку 10.

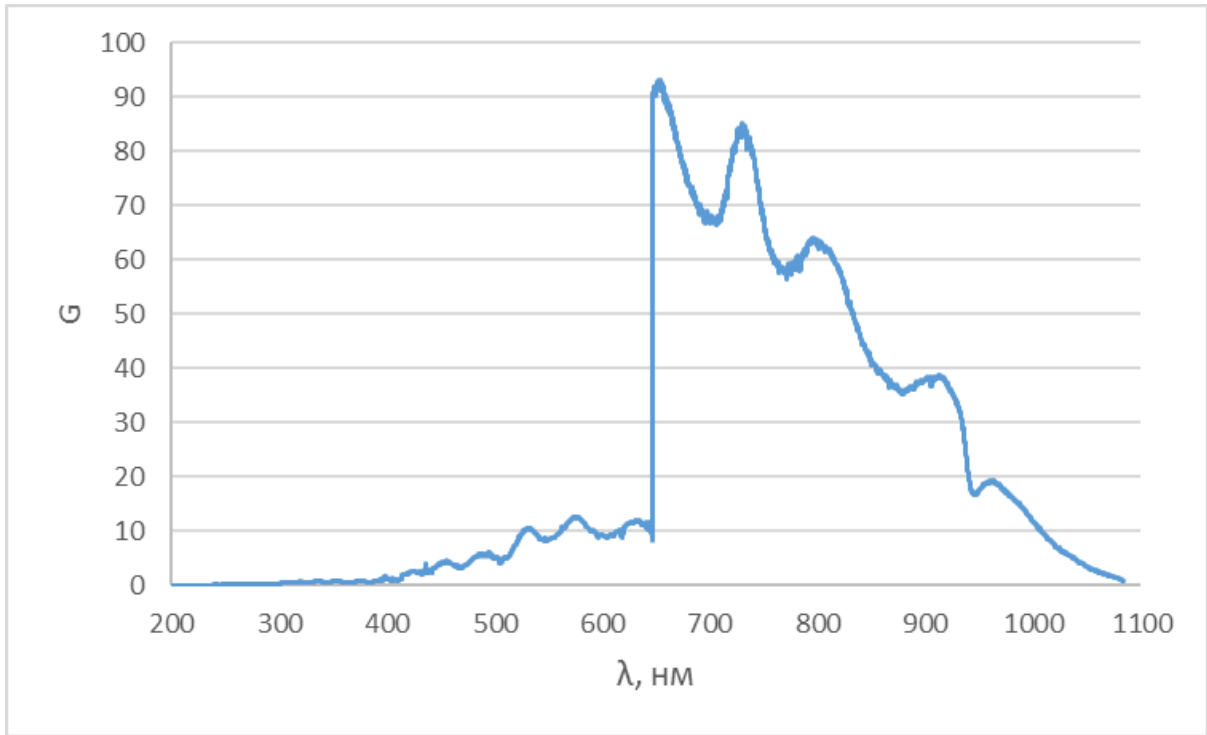


Рис. 9. Спектральна світлочутливість

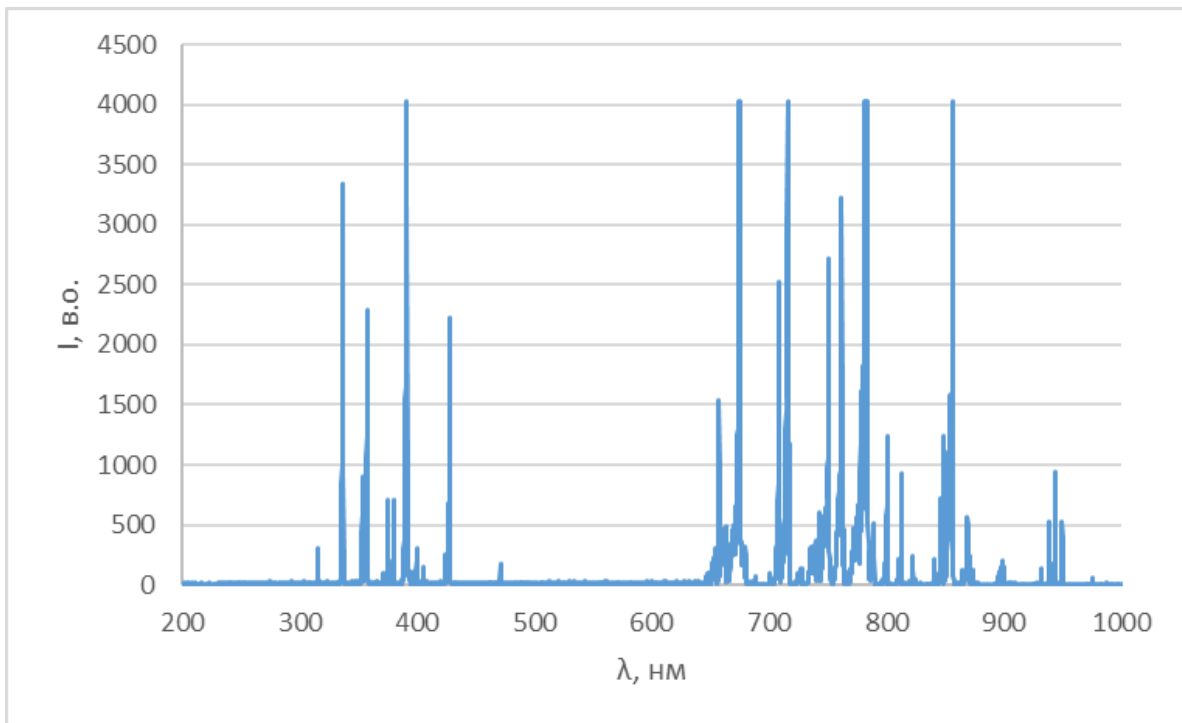


Рис. 10. Спектр з врахуванням фонові складові та спектральної чутливості

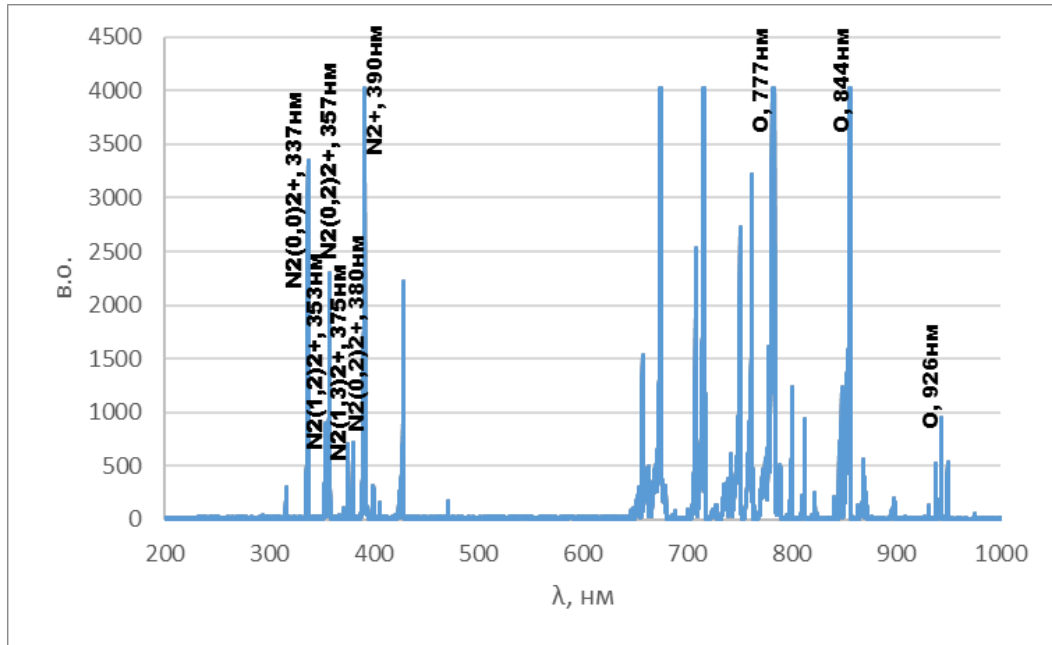


Рис. 11. Аналіз складу емісійного спектру

Фінальний оброблений спектр, який готовий до подальшого аналізу, представлено на Рисунку 11. У спектрі виділені піки для атомарних спектральних ліній кисню (777нм, 844нм та 926нм) та молекулярних ліній азоту (315нм, 337нм, 353нм, 357нм, 375нм, 380нм), а також пік для йону азоту на довжині хвилі 390нм. Невиділені піки у діапазоні 600-1000нм відповідають здвоєній інтенсивності через процес зшивання ділянок спектра, знятого двома ПЗС лінійками.

3.2. Визначення температури заселення збуджених електронних рівнів розряду за атомарними лініями кисню

Для визначення температури заселення електронних рівнів на основі вимірюваних спектрів використовувалися атомарні лінії кисню (з довжинами хвиль 777 нм, 844 нм та 926 нм), використовуючи графічний метод Больцмана. Константи для розрахунків були взяті з бази даних атомних спектрів NIST (National Institute of Standards and Technology) [23]. В таблиці 4 представлено розрахункові константи для атомарних ліній кисню, отримані з цієї бази даних.

Таблиця 4. Розрахункові константи для атомарних ліній кисню на довжинах хвиль 777 нм, 844 нм та 926 нм, за даними бази NIST.

Ion	Observed Wavelength Air (nm)	Ritz Wavelength Air (nm)	Rel. Int. (?)	A_{kl} (s^{-1})	f_{lk}	Acc.	E_i (eV)	E_k (eV)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	$g_j - g_k$	Type	TP Ref.	Line Ref.
0 I	777.417	777.4166	810	3.69e+07	3.35e-01	A	9.1460911	10.7404756	$2s^2 2p^3 (^4S^{\circ}) 3s \quad ^5S^{\circ}$	$2s^2 2p^3 (^4S^{\circ}) 3p \quad ^5P$	5 - 2		T5803,LS	L3760
0 I	844.625	844.6247	810	3.22e+07	1.15e-01	B	9.5213638	10.9888811	$2s^2 2p^3 (^4S^{\circ}) 3s \quad ^3S^{\circ}$	$2s^2 2p^3 (^4S^{\circ}) 3p \quad ^3P$	3 - 1		T5803,LS	L3760
0 I	926.277	926.2776	590	2.97e+07	5.35e-01	A	10.7404756	12.0786294	$2s^2 2p^3 (^4S^{\circ}) 3p \quad ^5P$	$2s^2 2p^3 (^4S^{\circ}) 3d \quad ^5D^{\circ}$	5 - 3		T5803,LS	L3760

Залежність температури заселення електронних рівнів від частоти при різних тисках відображена на графіку 12.

Таблиця 5. Розрахунки для температури заселення збуджених електронних рівнів

f, kHz	P, Па	Te(сер), К
20	50	3826
20	100	4225
45	50	4017
50	100	4600
90	50	3857
90	100	3950

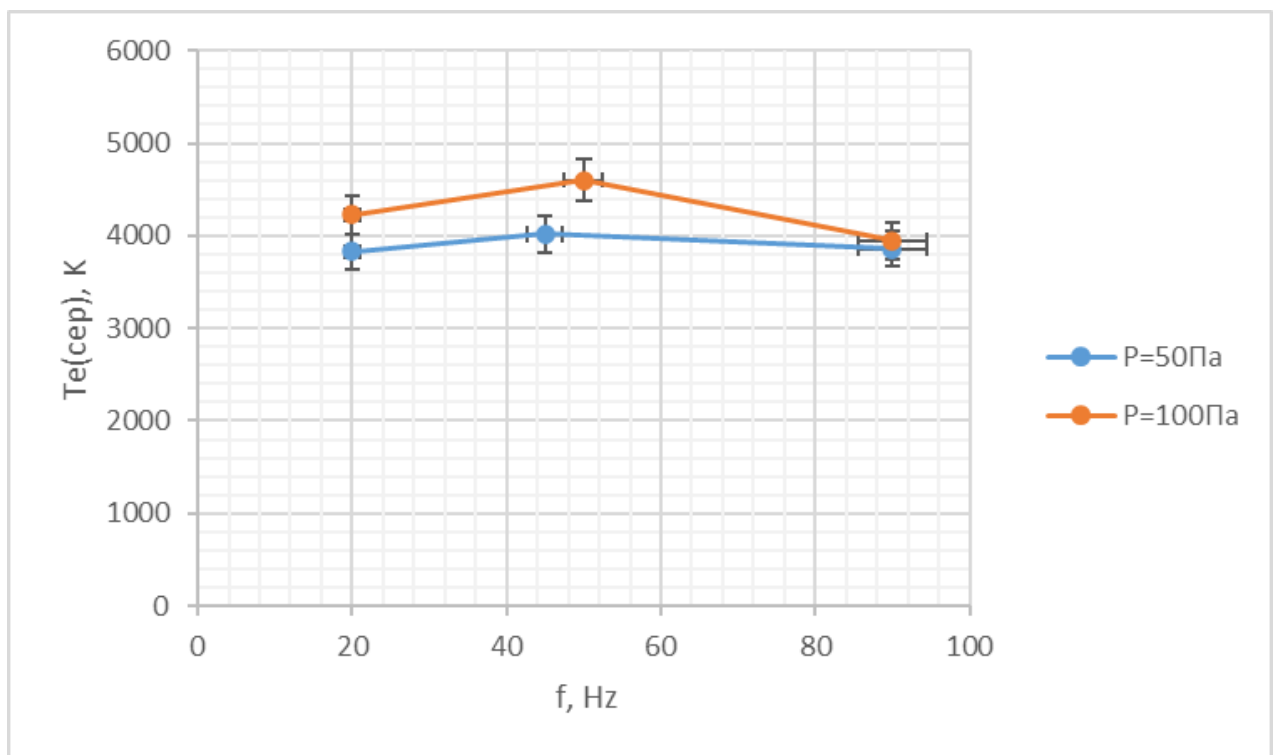


Рис. 12. Залежність електронної температури від частоти при значеннях тиску 50 Па та 100 Па

Залежність температури заселення електронних рівнів від тиску за різними частотами представлена на Рисунку 12.

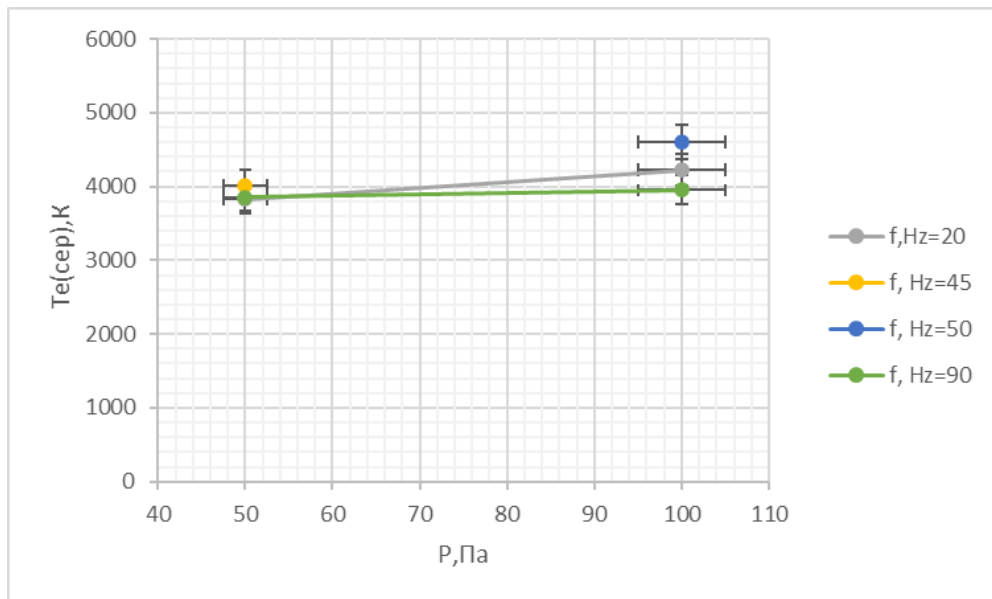


Рис 13. Залежність електронної температури від тиску при різних значеннях частоти

На рисунках 12 та 13 представлено, що температура заселення електронних рівнів приблизно стабільна і складає $T_e=4000\text{K}\pm 500\text{K}$, що в межах похибки однаково і не змінюється від частоти та тиску.

3.3. Визначення температури заселення збуджених коливальних рівнів розряду за молекулярними смугами азоту

У цьому дослідженні аналізувалася смуга 353-380 нм в емісійному спектрі другої позитивної системи азоту (СЗПу-ВЗПг), де перекриття з іншими спектральними лініями та смугами є відсутнім або мінімальним. Використовувались табличні дані, представлені на рисунку 14.

λ	I	v', v''	λ	I	v', v''	λ	I	v', v''
4976.4	0	4, 11	4059.4	8	0, 3	3371.3	10	0, 0
4916.8	0	1, 7	3998.4	9	1, 4	3339	2*	1, 1
4814.7	1	2, 8	3943.0	8	2, 5	3309	2*	2, 2
4723.5	1	3, 9	3894.6	7	3, 6	3285.3	3	3, 3
4667.3	0	0, 5	3857.9	5	4, 7	3268.1	4	4, 4*
4649.4	1	4, 10	3804.9	10	0, 2	3159.3	9	1, 0
4574.3	2	1, 6	3755.4	10	1, 3	3136.0	8	2, 1
4490.2	3	2, 7	3710.5	8	2, 4	3116.7	6	3, 2
4416.7	3	3, 8	3671.9	6	3, 5	3104.0	3	4, 3
4355.0	3	4, 9	3641.7	3	4, 6	2976.8	6	2, 0
4343.6	4	0, 4	3576.9	10	0, 1	2962.0	6	3, 1
4269.7	5	1, 5	3536.7	8	1, 2	2953.2	6	4, 2
4200.5	6	2, 6	3500.5	4	2, 3	2819.8	1	3, 0
4141.8	5	3, 7	3469	0	3, 4	2814.3	1	4, 1
4094.8	4	4, 8	3446	0	4, 5			

Рис. 14. Емісійний спектр другої позитивної системи азоту (СЗПу-ВЗПг)[24].

Для спрощення процедури визначення температури заселення коливальних рівнів (T_v) було використано відношення інтенсивностей на довжинах хвиль $I(375)/I(380)$ та $I(353)/I(357)$ з модельованого спектру. На основі цих даних були побудовані калібрувальні криві як функції температури заселення збуджених коливальних рівнів, які представлено на рисунку 15.

Таблиця 6. Розрахунки для температури заселення збуджених коливальних рівнів

f, kHz	Тиск, Па	Tv(375/380)	Tv(353/357)
20	50	5200	4997
20	50	5500	5050
45	50	5000	4840
45	50	5000	4350
50	50	4930	5000
50	50	5100	4950
90	50	5300	5050
20	100	5090	5010
45	100	5090	4520
90	100	4545	3630

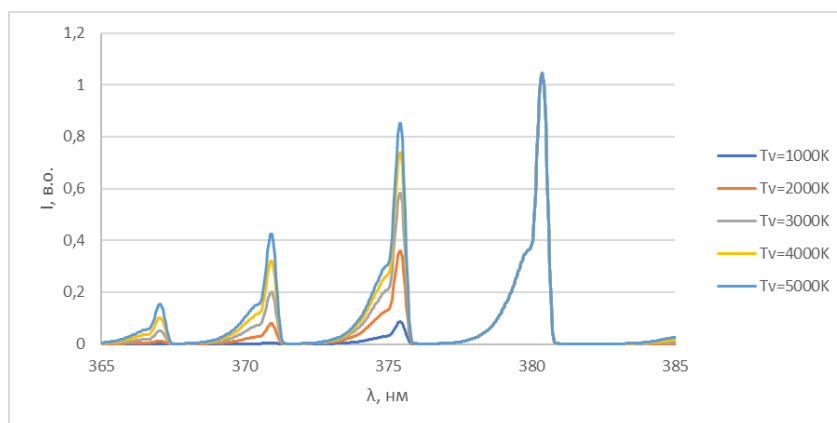
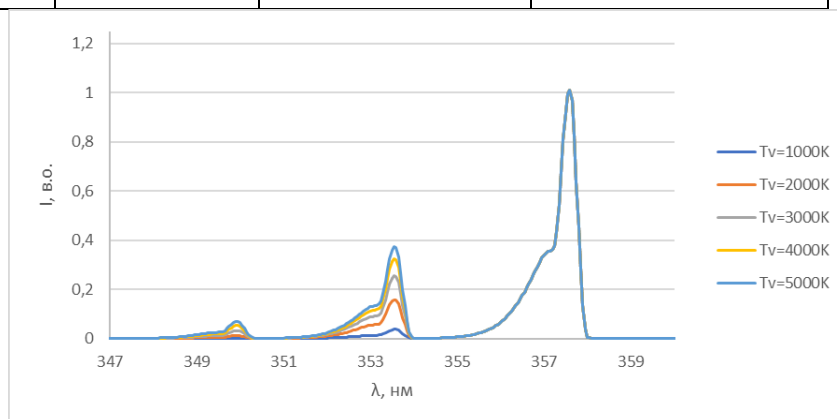


Рис 15. Модельований емісійний спектр
а) в діапазоні 345-360 нм;

б) в діапазоні 365-380 нм.

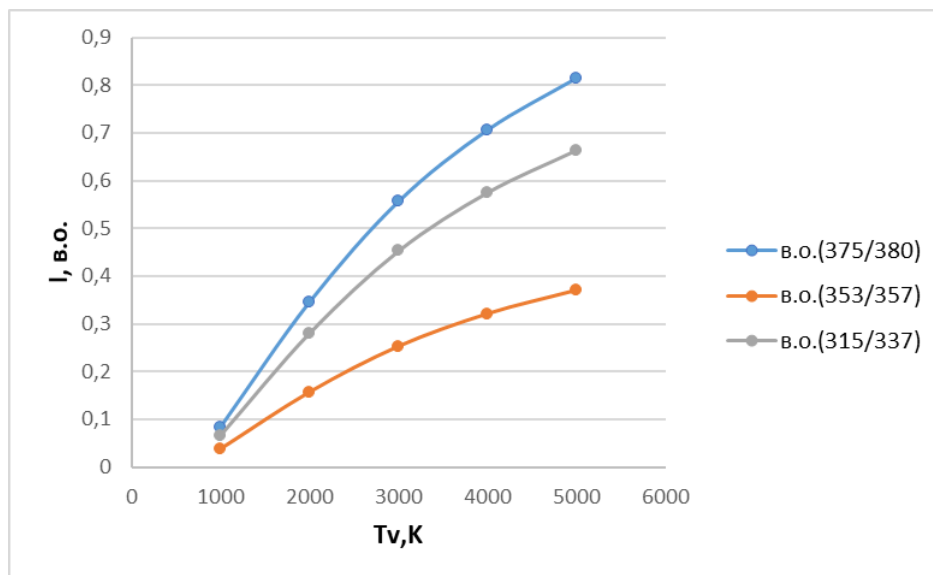


Рис. 16. Криві для визначення температур заселення за емісійними смугами (0,2) та (1,2) N2(C-B).

За допомогою порівняння експериментальних даних з калібрувальними кривими було встановлено температурну залежність від тиску та частоти. На рисунку 16 представлено, як температура заселення збуджених коливальних рівнів змінюється в залежності від частоти при різних рівнях тиску.

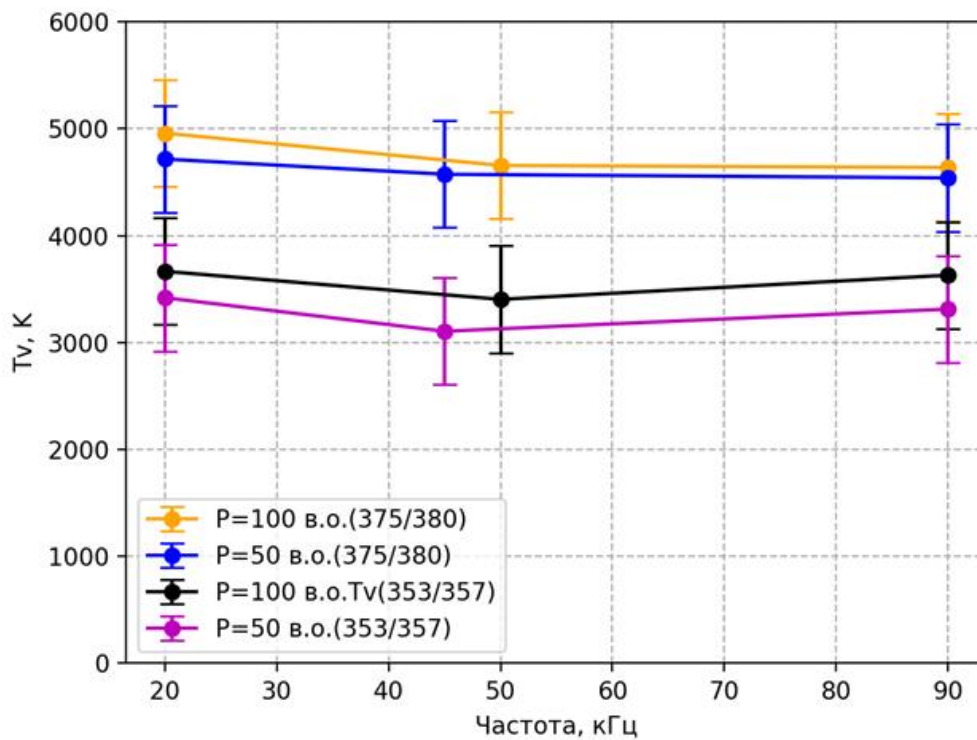


Рис. 17. Залежність коливальної температури від частоти за тиском 50 Па та 100 Па.

На рисунку 16 зазначено, що температура залишається стабільною в межах похибки і практично не залежить від частоти. Рисунок 17 демонструє, як коливальна температура змінюється з тиском при різних частотах.

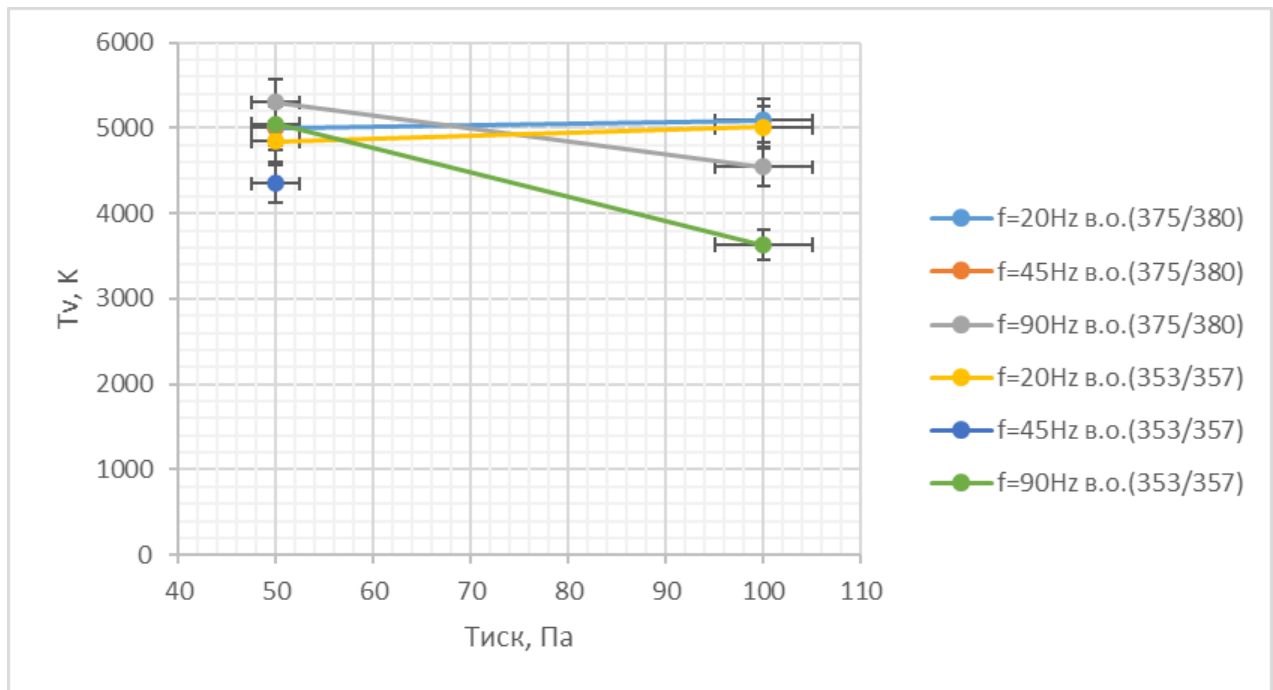


Рис. 18. Залежність коливальної температури від тиску за різними частотами.

На рисунку 17 видно, що коливальна температура слабко зростає з підвищенням тиску. Незважаючи на корекцію на поглинання скла та врахування спектральної чутливості приладу, використання даних інтенсивностей на різних довжинах хвиль показує різні температурні показники, що вимагає подальшого дослідження. Встановлено, що температура заселення збуджених коливальних рівнів становить $T_v = 4500\text{K} \pm 500\text{K}$ і слабко зростає з підвищенням тиску.

3.4. Визначення температури заселення збуджених обертальних рівнів за допомогою молекулярних ліній азоту

За допомогою порівняння експериментальних даних з модельованими кривими було встановлено температуру заселення збуджених обертальних рівнів.

Модельовання для заданої $T_e=4500\text{K}$, $T_v=4500\text{K}$ при різних T_r .

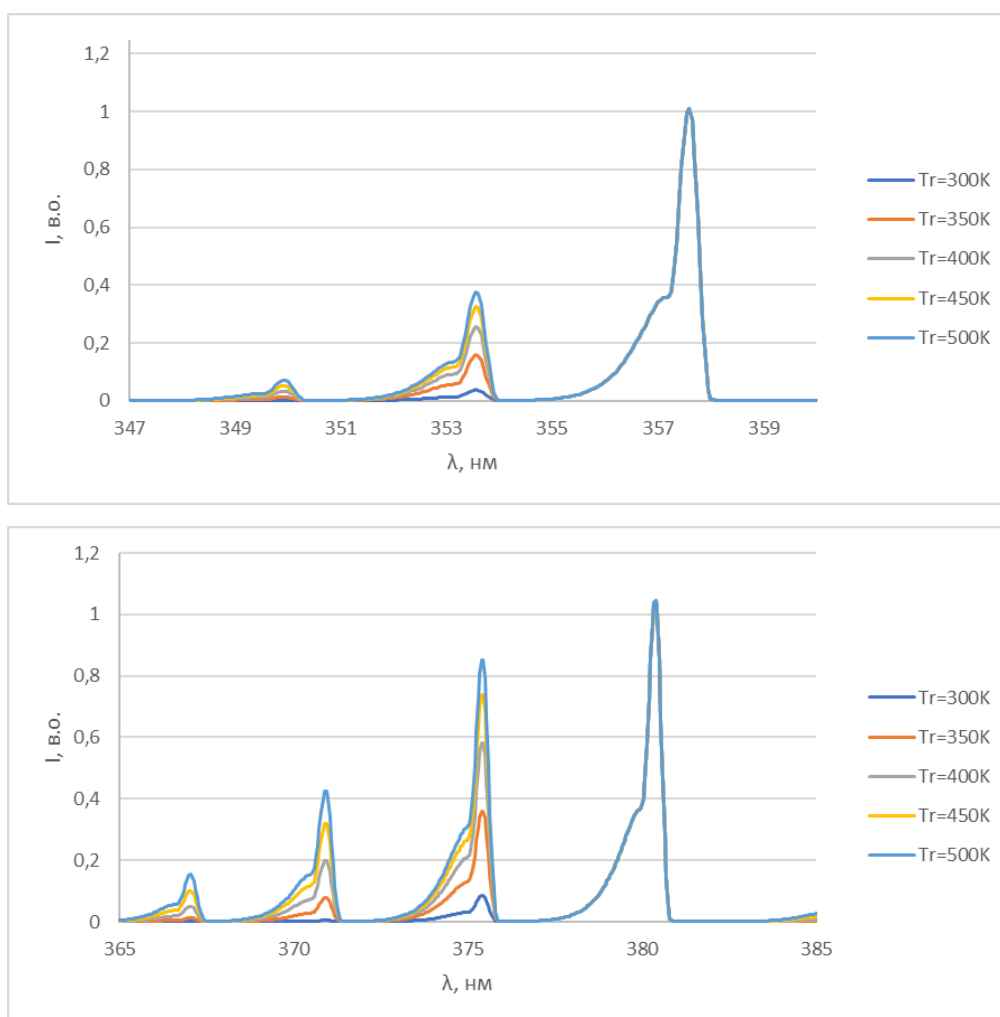


Рис 19. Модельований емісійний спектр

а) в діапазоні 345-360 нм;

б) в діапазоні 365-380 нм.

Результати порівняння модельованого емісійного спектру з експериментальними даними представлені на рисунку 19.

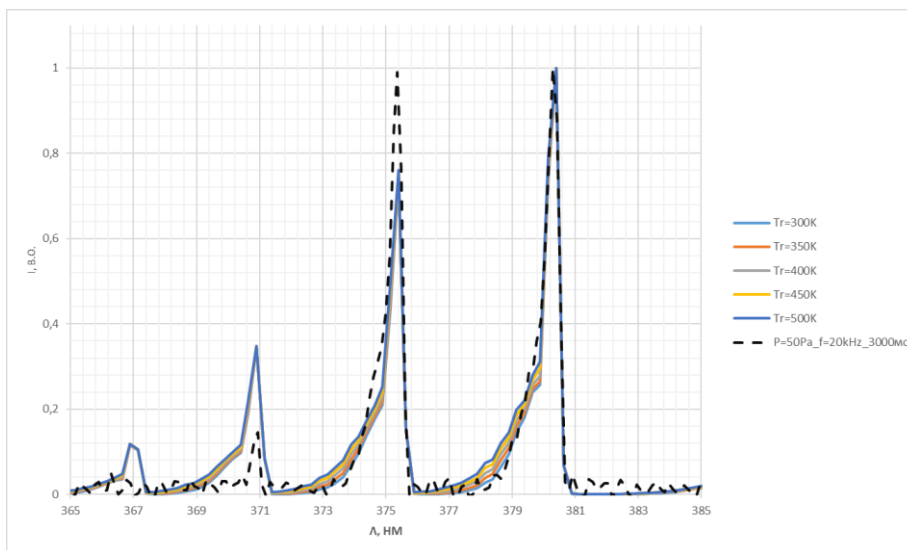
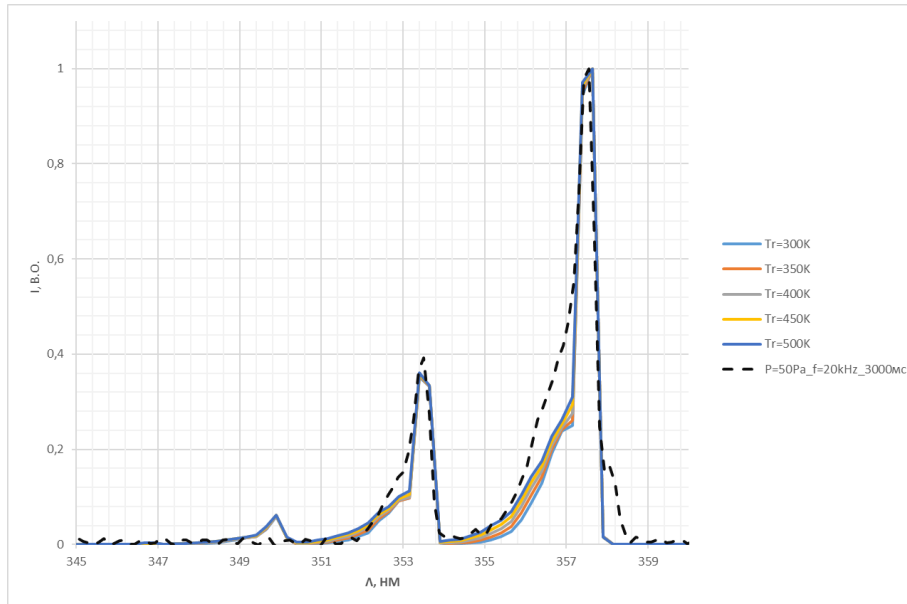


Рис. 20. Порівняння модельованого емісійного спектру N2(C-B) у діапазоні 345–380 нм при фіксованих T_v та змінювальних T_r з експериментальними даними:

- а) для тиску 50 Па та частоти 20 кГц в діапазоні 345-360 нм;*
- б) для тиску 50 Па та частоти 20 кГц в діапазоні 365-380 нм.*

З аналізу рисунку 19 можна зробити висновок, що температура заселення збуджених обертальних рівнів становить приблизно $T_r \approx 300\text{K}$ і слабо залежить від параметрів розряду.

Зокрема, спостерігається зниження температури при зменшенні тиску.

ВИСНОВКИ

Результати були отримані при наступних параметрах робочої системи: тиск 50 Па та 100 Па, струм від 400 до 600 мА, напруга до 1200 В, і частота розряду від 20 до 90 кГц.

Було встановлено, що температура заселення збуджених електронних рівнів, яка була виміряна за допомогою атомарних ліній кисню, складала приблизно $4000\text{K} \pm 500\text{K}$ і виявилася стабільною незалежно від змін в досліджених параметрах.

Значення температури заселення збуджених коливальних рівнів, отримані через молекулярні лінії азоту, показали незначне зростання до $4500\text{K} \pm 500\text{K}$ з підвищенням тиску.

Температура заселення збуджених обертальних рівнів, визначена за молекулярними смугами азоту (353 нм, 357 нм, 375 нм та 380 нм) залишалася на рівні приблизно $300\text{K} \pm 50\text{K}$ і демонструвала мінімальні зміни з тиском.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bellakhal N, Draou K, Cheron BG, Brisset JL. Protective films formed on copper by oxygen plasma treatment. *J Electroanal Chem* 1997a;431:297–9.
2. Menashi WP. Treatment of surfaces. US Patent 3383163; 1968.
3. Peeples RE, Anderson NR. Microwave coupled plasma sterilization and depyrogenation II. Mechanisms of action. *J Parenter Sci Technol* 1985;39:9-14.
4. Boucher RM. State of the art in gas plasma sterilization. *Med Device Diagnostic Indus* 1985;7:51–6.
5. Nelson CL, Berger TJ. Inactivation of microorganisms by oxygen gas plasma. *Curr Microbiol* 1989;18:275–6.
6. Koulik P, Begounov S, Goloviatinskii S. Atmospheric plasma sterilization and deodorization of dielectric surfaces. *Plasma Chem Plasma Proc* 1999;19:311–26.
7. Li, L., Jiang, J., Li, J., Shen, M., He, X., Shao, H., et al. (2014). Effects of cold plasma treatment on seed germination and seedling growth of soybean.
8. Li, L., Li, J., Shen, M., Zhang, C., and Dong, Y. (2015). Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress. *Sci. Rep.* 5, 13033. doi: 10.1038/srep13033
9. Song J-S, Kim SB, Ryu S, Oh J and Kim D-S (2020) Emerging Plasma Technology That Alleviates Crop Stress During the Early Growth Stages of Plants: A Review. *Front. Plant Sci.* 11:988. doi: 10.3389/fpls.2020.00988
10. Filatova, I. I., Azharonok, V. V., Goncharik, S. V., Lushkevich, V. A., Zhukovsky, A. G., and Gadzhieva, G. I. (2014). Effect of RF plasma treatment on the germination and phytosanitary state of seeds. *J. Appl. Spectr.* 81, 250–256. doi: 10.1007/s10812-014-9918-5
11. Jiang, J., Lu, Y., Li, J., Li, L., He, X., Shao, H., et al. (2014b). Effect of seed treatment by cold plasma on the resistance of tomato to *Ralstonia solanacearum* (bacterial wilt). *PloS One* 9, e97753. doi: 10.1371/journal.pone.0097753

12. Noodén, L. D., Blakley, K. A., and Grzybowski, J. M. (1985). Control of seed coat thickness and permeability in soybean: a possible adaptation to stress. *Plant Physiol.* 79, 543–545. doi: 10.1104/pp.79.2.543
13. Bormashenko, E., Grynyov, R., Bormashenko, Y., and Drori, E. (2012). Cold radiofrequency plasma treatment modifies wettability and germination speed of plant seeds. *Sci. Rep.* 2, 741–748. doi: 10.1038/srep00741
14. Filatova, I. I., Azharonok, V., Lushkevich, V., Zhukovsky, A., Gadzhieva, G., Spaisić, K., et al. (2013). “Plasma seeds treatment as a promising technique for seed germination improvement,” in: *Proceedings of the 31st International Conference on Phenomena in Ionized Gases*, (Granada, Spain: ICPIG (International Conference on Phenomena in Ionized Gases)). pp. 4–7.
15. Taylor, A. H., and Grotta, A. T. (2017). Enhancement of crop yield via plasma seed treatment. *Agron. J.* 109:1-6.
16. Sanchez, R. P., and Thomas, W. B. (2011). Effects of plasma exposure on seedling vigor and plant health. *Plant Methods* 7, 23.
17. Goldstein, B. A., and Newman, J. R. (2018). Long-term effects of plasma exposure on plant genetics and soil quality. *Environ. Sci. Technol.* 52, 1127–1134.
18. Hancock, E. R., and Daniels, J. P. (2016). A comprehensive review of plasma agriculture. *J. Agri. Food Chem.* 64, 2041–2050.
19. Mayer, V., and Bright, J. (2020). Innovative applications of plasma technology in plant science. *Trends Plant Sci.* 25, 123-131.
20. Gibson, L. M., and Roberts, K. G. (2015). Field evaluation of plasma-treated seeds. *Crop Sci.* 55, 1239-1247.
21. Sullivan, J. L., and Kirkpatrick, A. M. (2012). Effect of atmospheric pressure plasmas on plant pathogens and yield. *J. Appl. Bot. Food Qual.* 89, 210-219.
22. Evans, C. D., and Harris, F. P. (2019). Technological advancements in agricultural plasma applications. *Agri. Syst.* 174, 22-29.
23. Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2022). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.10), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd>

[2023, May 4]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

DOI: <https://doi.org/10.18434/T4W30F>

24. The Identification of Molecular Spectra. By R. W. B. Pearse and A. G. Gaydon.

221 + viii pp., 8 plates. New York: John Wiley and Sons, Inc. 1941.