

О. А. Федорович^{1,*}, Л. М. Войтенко¹, В. В. Гладковський², О. В. Гладковська¹¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна² Президія Національної академії наук України, Київ, Україна

Відповідальний автор: oafedorovich@kinr.kiev.ua

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПАДУ ЩІЛЬНОЇ ПЛАЗМИ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ РОЗРЯДІВ У ВОДІ, ІНІЦІЙОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИМ ВИБУХОМ ЗАЛІЗНОГО ПРОВІДНИКА

У роботі наведено результати досліджень коефіцієнтів розпаду щільної плазми імпульсних розрядів у воді, ініційованих електричним вибухом залізного провідника. Виконано аналіз розгорнутих у часі та просторі спектрів випромінювання розрядів, а також вивчено динаміку спектрів поглинання з інтервалом 5 мкс. Визначено концентрацію електронів щільної плазми в різні моменти часу, що дало змогу встановити коефіцієнти її розпаду при концентраціях електронів у діапазоні 10^{20} - 10^{21} см⁻³. З'ясовано, що при однакових концентраціях електронів у плазмі, коефіцієнти розпаду плазми з домішками заліза узгоджуються з коефіцієнтами розпаду плазми з домішками вольфраму.

Ключові слова: щільна плазма, концентрація електронів, коефіцієнт розпаду, імпульсний розряд у воді, спектри випромінювання, домішки атомів металу, розгортки спектрів, динаміка оптичних спектрів.

1. Вступ

Щільна плазма знаходить широке застосування у різних сферах науки та техніки, зокрема в розрядно-імпульсних та космічних технологіях, МГД-генераторах, газофазних ядерних реакторах тощо [1, 2]. Водночас дослідження щільної плазми мають важливе значення для астрофізики, оскільки вони дають можливість вивчати процеси охолодження космічних тіл з високою температурою та концентрацією електронів [1].

Для розробки пристроїв на основі щільної плазми необхідно мати дані про її фізичні властивості та залежність їх від різних параметрів, таких як електронна температура, концентрація електронів у плазмі та її хімічний склад. У сучасній літературі практично відсутні надійні експериментальні дані про щільну плазму. Це пояснюється відсутністю надійних методик для вимірювання одного з основних її параметрів – концентрації електронів (N_e). При концентраціях електронів, що перевищують 10^{19} см⁻³, виникають змінні електричні мікрополя, які співрозмірні з напруженостями полів, що присутні всередині атомів. Вони призводять до появи нових властивостей щільної плазми, які не властиві розрідженій. Зокрема, спостерігається ефект «оптичної щілини», величина якої однозначно залежить від концентрації електронів і практично не залежить від температури плазми, як показано у роботі [3].

Високовольтні імпульсні розряди у воді генерують щільну плазму, в якій при розширенні

плазмового каналу поступово зменшується температура і концентрація електронів, і вона перетворюється в добре вивчену розріджену плазму. Незважаючи на швидкоплинність імпульсних розрядів у воді, щільна плазма, що утворюється при цих розрядах, є зручним об'єктом для експериментальних досліджень. Це пов'язано з тим, що інерційні властивості і практична нестискуваність води призводять до чіткого спостереження границі переходу плазма - вода, незалежно від іонізації ударною хвилею, як це відбувається у розрядах у стиснених газах або вакуумі. У таких розрядах зовнішня поверхня ударної хвилі випромінює більшу температуру і, відповідно, має більшу інтенсивність випромінювання, ніж внутрішні області розряду. Змінюючи параметри розрядного контуру та напругу на розрядній батареї, можна в широкому діапазоні змінювати параметри плазми.

Варто відзначити, що чисто іскрові розряди у воді мають погану відтворюваність, що призводить до суттєвого відхилення параметрів плазми в каналі. Щоб уникнути цього, використовують провідники з різних матеріалів, які вибухають при нагріванні їх імпульсним електричним струмом. Змінюючи матеріал провідника, можна отримувати плазму з домішками різних металів, випромінювання яких при високих значеннях концентрацій плазми практично не досліджено. Водночас змінюючи діаметр ініціюючих провідників, можна легко змінювати кількість домішок певного матеріалу і вивчати їхній вплив на властивості щільної плазми, такі як випромінювання

плазми, рекомбінаційні властивості та електропровідність, які на сьогодні практично мало вивчені. Крім того, як показали наші дослідження [4, 5], поблизу електродів спостерігаються викиди з катодних плям. Спектри випромінювання цих ділянок є суцільними, і на них спостерігаються лінії випромінювання (поглинання) міді (в експерименті використовувалися мідні електроди), що змінюються з плином часу [6]. Викиди парів міді також можуть впливати на електропровідність розряду у воді. При цьому розміри викидів можуть досягати до 20 мм від електродів, що потрібно враховувати при розрахунках параметрів плазми.

У зв'язку з енергетичними проблемами, такі дослідження також дуже важливі для розрахунків «зачорнюючих» (ізолюючих від теплового випромінювання) матеріалів для перспективних розробок оболонок (корпусів) газофазних ядерних реакторів та реактивних двигунів на їхній основі. «Зачорнюючими» матеріалами є гази або суміші їх з парами лужних або інших металів при високих тисках та температурах (тиск порядку 1000 атм, температура ядерного палива

$(40 - 60) \cdot 10^3$ К, температура робочого тіла $(8 - 10) \cdot 10^3$ К, температура розплавленого урану $(1500 - 2300)$ К), які ізолюють стінки реактора від плавлення [1, 2].

Крім того, варто чітко розрізняти неідеальну і щільну плазму з високими концентраціями електронів, оскільки показник ступеня неідеальності може бути однаковим як при ультранизких температурах $(10 - 100)$ К та малих концентраціях електронів, так і при високих температурах і великих значеннях концентрації електронів у плазмі.

У даній роботі наведено результати досліджень, що проводилися при електронних концентраціях $(10^{20} - 10^{21})$ см⁻³ та температурах $(7 - 45) \cdot 10^3$ К.

2. Експериментальний пристрій та методики досліджень

Схему експериментального пристрою наведено на рис. 1. До її складу входить генератор імпульсів струму (ГІС), експериментальний бак з прозорими вікнами, розрядний вузол, схеми керування й вимірювальні стенди.

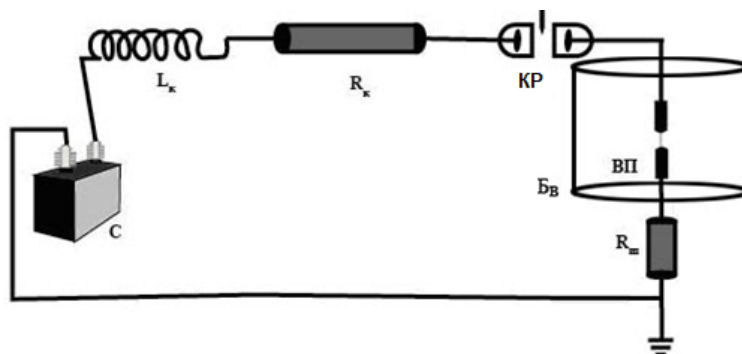


Рис. 1. Схема експериментального пристрою, для вимірювання електричних параметрів плазми в каналі. С - ємність 14,6 мкФ, Lк - індуктивність контуру 0,43 мкГн, R - власний опір контуру, КР - керований вакуумний розрядник, ВП - електрично вибухаючий провідник, Бв - бак з дистильованою водою, Rш - вимірювальний безіндуктивний коаксіальний шунт.

ГІС – це конденсаторна батарея з ємністю 14,6 мкФ, індуктивністю розрядного контуру 0,43 мкГн і робочою напругою, що змінюється в межах від 3 до 37 кВ (це дає можливість накопичувати енергію до 10 кДж). Конденсаторна батарея запускається за допомогою керованого вакуумного розрядника. При цьому система керування давала змогу здійснювати синхронізацію запуску ГІС з вимірювальними стендами.

Розрядний вузол пристрою має коаксіальний струмопровід з розмірами, що дають змогу досліджувати плазму без впливу відбитих ударних хвиль, а розміри експериментального бака забезпечують коректне вимірювання просторово-часових та спектральних характеристик розряду тривалістю до 240 мкс. Проте для вимірювань

параметрів розряду достатньо 15 мкс, оскільки впродовж решти часу плазмовий канал в основному релаксує.

Для отримання більш точних вимірювань електричних параметрів імпульсного розряду, ініційованого електричним вибухом металевого провідника, проводилася окрема обробка активної та релаксаційної стадій розряду. Оскільки на початковій стадії електричного пробоя падіння напруги на розрядному каналі відповідає величині напруги на конденсаторній батареї, а на стадії релаксації розряду падіння напруги становить менше 1 кВ на конденсаторній батареї 37 - 3 кВ, це не дає змоги з достатньою точністю вимірювати величину енергії, що вкладається в плазмовий канал. Таким чином, необхідно проводити декілька етапів вимірювання електричних пара-

метрів розряду, а саме: активної, тобто від подачі напруги на розрядний проміжок до максимального вкладу енергії в плазмовий канал (перший півперіод), і релаксаційної стадії розряду (другий і наступні півперіоди).

Крім того, особливістю щільної плазми, ініційованої електричним вибухом металевих провідників, є той факт, що енергія в канал вкладається продовж десятків мікросекунд, а випромінювання плазми може відбуватися декілька сотень мікросекунд і не корелює з вкладом енергії в плазмовий канал.

З метою зниження похибок при вимірюваннях електричних параметрів, нами були розроблені спеціальні коаксіальні малоіндуктивні шунти та резистивні без'ємнісні дільники напруги. Сигнали з цих пристроїв безпосередньо подавалися на пластини осцилографів з пам'яттю (С8-14, С8-17). Одночасно на один з осцилографів подавався сигнал з дільника напруги та з пристрою прив'язки початку розширення каналу. Це дає змогу здійснювати синхронізацію вимірювань електричних параметрів плазмового каналу та його геометричних розмірів з високою точністю. Для експериментального визначення коефіцієн-

тів розпаду (а також іонізації та рекомбінації) необхідно знати концентрації електронів (N_e), атомів (N_a), а також температуру плазми та зміну цих параметрів з часом.

Варто зазначити, що випромінювання плазми не припиняється одночасно зі зникненням струму в розряді (що є типовим для розрідженої плазми). Більше того, час випромінювання щільної плазми в декілька разів перевищує час проходження струму в розрядному проміжку. Крім того, час випромінювання плазмового каналу збільшується як зі збільшенням енергії, що вкладається в плазмовий канал, так і зі збільшенням діаметра ініціюючого розряду провідника.

На рис. 2 зображено типову осцилограму імпульсного розряду у воді, ініційованого електричним вибухом залізного провідника діаметром 160 мкм та довжиною 40 мм. Як можна бачити, основний внесок потужності в розряд, а відповідно, і енергії, відбувається протягом першої половини періоду. Внеском енергії у другому і наступних півперіодах можна знехтувати, про що свідчать дані на рис. 3, де наведено залежності введеної в плазмовий канал потужності та енергії від часу.

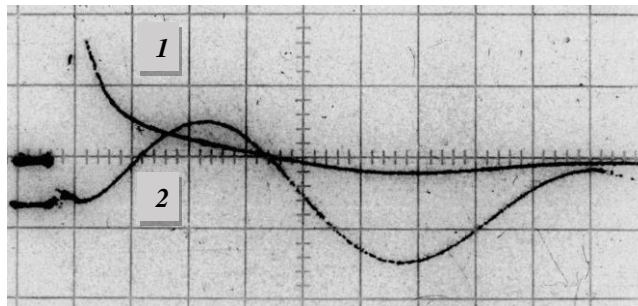


Рис. 2. Осцилограми падіння напруги на розрядному проміжку (1) і струму в розряді (2) для ініціюючого провідника із заліза, $U = 20$ кВ, $C = 14,6$ мкФ, швидкість розгортки 2,5 мкс на поділку. Тривалість розряду 15,5 мкс. Напруга 7 кВ на поділку, максимальний струм 90 кА.

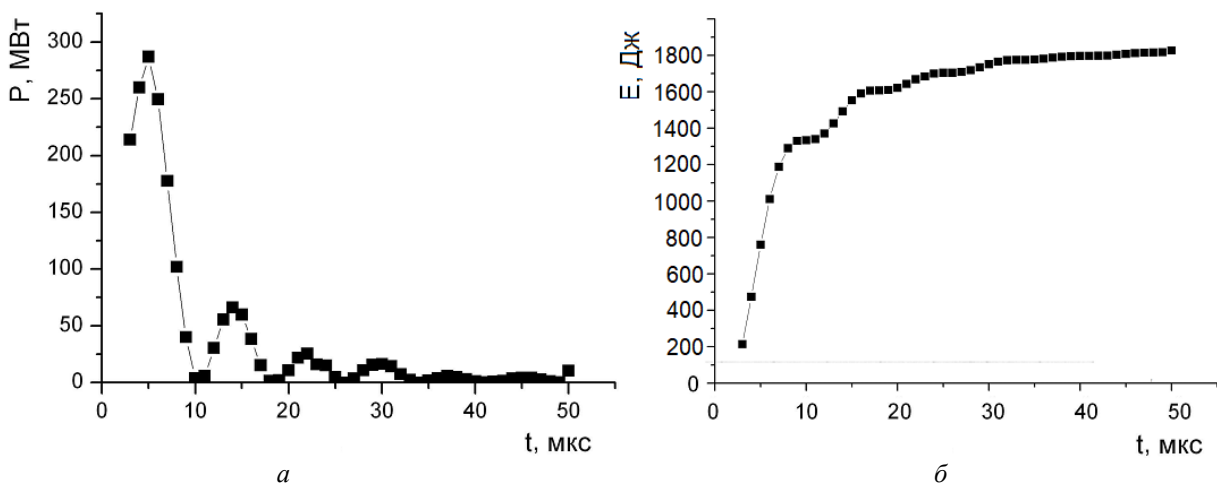


Рис. 3. Залежність введеної в плазмовий канал потужності (а) та енергії (б) від часу.

3. Реєстрація випромінювання плазмового каналу

Для отримання інформації про динаміку спектрів випромінювання (поглинання) необхідно обрати метод їхньої надійної реєстрації, нечутливий до електромагнітних наводок, які випромінюються розрядним контуром. Варто зазначити, що повністю позбутися електромагнітних наведень практично неможливо, особливо при малих значеннях вимірюваних сигналів і різких змінах струмів та падінь напруг при пробі парів нагрітих металів і утворенні плазмового каналу в рідині. Крім того, при використанні фотоелектронних помножувачів (ФЕП) для реєстрації інтенсивності випромінювання, необхідно переконатися, що вимірювання проводиться на ділянці спектра, яка не містить ліній поглинання.

За допомогою ФЕП можна вимірювати інтенсивності, що відрізняються не більше, ніж у 10 разів. У нашому випадку необхідно розрізнити інтенсивності в 100 і більше разів. Такої точності можна досягти за допомогою високочутливих аерофотоплівок з високою роздільною здатністю та широким діапазоном реєстрації інтенсивності [7]. Використання таких фотоплівок за розробленою нами методикою дає змогу реєструвати ділянку спектра приблизно 70,0 нм з роздільною здатністю в одиниці ангстрема. Це надає можливість фіксувати моменти появи різних ліній поглинання або випромінювання з високою точністю на фоні неперервного спектра. Розроблений нами спосіб калібрування спектра випромінювання за інтенсивністю дає можливість вимірювати відношення інтенсивності більше, ніж до 100 разів.

Описані вище розробки дали змогу отримувати розгортки спектрів випромінювання та поглинання, розділені за довжинами хвиль у просторі та часі. Зйомки таких спектрів проводилися через кожні 5 мкс за допомогою модернізованого нами кіноспектрографа, оптичну схему якого наведено на рис. 4.

Удосконалення оптичної схеми ВФУ-1 дали змогу збільшити світлосилу камери майже у два рази порівняно зі стандартною. Було замінено об'єктив фотореєстратора ВФУ-1 з фокусною відстанню 21 см на об'єктив з фокусною відстанню 28 см. При цьому зображення каналу розряду на вхідній щілині кіноспектрографа зменшилося приблизно в 1,8 раза, а на плівці – у 2,1 раза. Це дало змогу вимірювати розподіл інтенсивності випромінювання ділянки каналу. Також було розроблено десятиступінчастий послаблювач для калібрування плівки за її почорніннями. Це дало можливість охопити весь

діапазон почорніння плівки, що відповідає інтенсивності випромінювання плазми при температурах $(6 - 39) \cdot 10^3$ К.

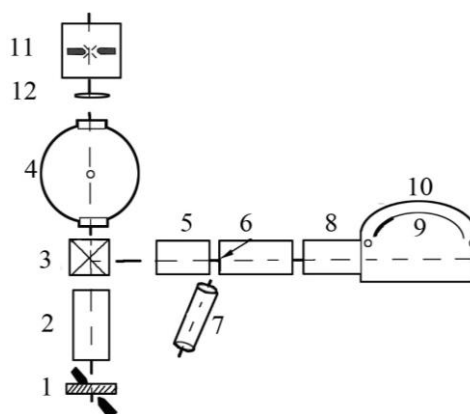


Рис. 4. Оптична схема для отримання спектрограм: 1 – еталонне джерело ЕВ-45; 2 – компенсаційний бачок; 3 – поворотні дзеркала; 4 – експериментальний бак; 5 – об'єктив; 6 – щілина спектроприставки; 7 – мікроскоп; 8 – спектроприставка; 9 – камера ВФУ-1; 10 – плівковий десятиступінчастий послаблювач; 11 – дуговий генератор; 12 – об'єктив.

Після одержання записів мікрофотограм спектрів у різні моменти часу, проводилося ототожнення спектра поглинання через ідентифікацію ліній, що з'явилися на фоні суцільного спектра. Для цього встановлювалися довжини хвиль поглинання матеріалу, а з використанням таблиць спектральних ліній визначалися енергії їхнього збудження. За відомим потенціалом іонізації даного елемента і енергією збудження енергетичного рівня розраховувалась їхня різниця, що відповідає величині «оптичної щілини» в спектрі поглинання для кожної з ліній. Слід відзначити, що при використанні резонансних ліній у спектрі поглинання для визначення величини «оптичної щілини» необхідно переконатися, що ці лінії не спостерігаються при поглинанні власних домішок води.

4. Результати досліджень

Під час дослідження випромінювання імпульсних розрядів у воді необхідно мати інформацію про вид спектра та розподіл інтенсивностей за довжинами хвиль, оскільки при розрядах у воді, що ініціюються без електричного вибуху провідника, спектри випромінювання є суцільними і часто з відхиленнями від спектра абсолютно чорного тіла. Проте при ініціюванні розрядів металевими провідниками на суцільних спектрах проявляються лінії поглинання атомів матеріалу ініціюючих провідників. Важливо зауважити, що момент появи цих ліній залежить як від властивостей матеріалу і його кількості, так і від параметрів розрядного контуру та часу спостереження.

Матеріал ініціюючого провідника, такий як залізо, обрано з метою використання його лінійчастого спектра випромінювання (поглинання) у видимому діапазоні, оскільки він містить велику кількість спектральних ліній і широко використовується як еталон для порівняння спектрів випромінювання інших матеріалів за довжинами хвиль. Крім того, спектр заліза є одним з найкраще вивчених у практичному аспекті. Ще однією перевагою спектра випромінювання заліза є наявність добре вивченої схеми Гротріана, що включає перелік його термів (рівнів) та переходів, а також детально вивчені сили осциляторів, статистичні ваги, довжини хвиль та енергетичні рівні [8 - 10].

На рис. 5 зображено розподіл інтенсивності випромінювання у видимому діапазоні для досліджуваного розряду з домішками заліза. Його особливістю є відсутність різких провалів інтенсивності випромінювання, які були виявлені при дослідженні щільної плазми з домішками вольфраму [11].

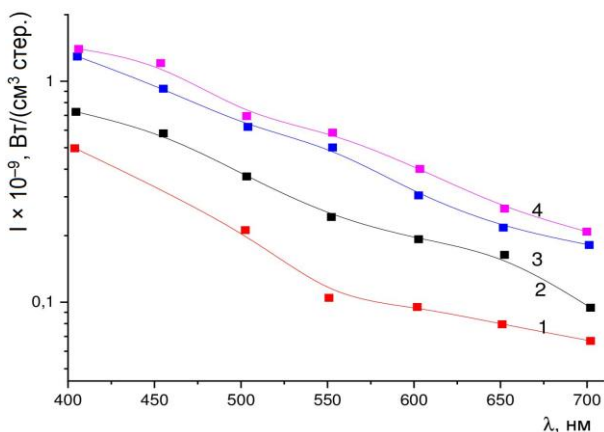


Рис. 5. Залежність інтенсивності випромінювання від довжини хвилі для провідника із заліза діаметром 160 мкм та довжиною 40 мм, $U = 20$ кВ, $C = 14,6$ мкФ, $L = 0,43$ мкГн. $t = 9$ мкс; $2 = 14$ мкс; $3 = 18,5$ мкс; $4 = 23$ мкс. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Розглянемо більш детально динаміку спектра випромінювання щільної плазми в діапазоні 340 – 440 нм. Тільки в цьому діапазоні довжин хвиль (від 335,0 до 427,5 нм) випромінюється близько 250 атомарних ліній заліза. Типові записи спектрів, розгорнутих у часі, просторі та за довжинами хвиль, у різні моменти часу, представлено на рис. 6 для одного з режимів розряду з тривалістю 164 мкс та інтервалом часу 10 мкс при початковій напрузі на конденсаторній батареї 37 кВ.

Характерною особливістю випромінювання плазмового каналу на початковій стадії є відсутність будь-яких ліній поглинання в області 340 - 430 нм продовж перших 54 мкс. З плином

часу розпочинають спостерігатися лінії поглинання заліза, що виникають при переходах з основного стану на найнижні енергетичні рівні. Зокрема, спостерігаються переходи з основного рівня на рівень з енергією збудження 3,36 еВ і довжиною хвилі 367,9 нм, з основного рівня на рівень з енергією збудження 3,33 еВ і довжиною хвилі 371,9 нм, а також з енергією збудження 3,4 еВ і довжиною хвилі 373,7 нм. Крім того, спостерігаються переходи з енергією збудження 3,4 еВ і довжиною хвиль 374,5, 374,5 та 374,8 нм, які практично зливаються в одну суцільну лінію [8]. У цих випадках величини «оптичні щілини» становлять 4,57 та 4,27 еВ, а концентрація електронів близько $2 \cdot 10^{21}$ см⁻³.

На 74 мкс починають проявлятися резонансні лінії поглинання Ca I (422,7 нм з енергією збудження 2,93 еВ) та дублету іона Ca II (396,8 нм з енергією збудження 3,12 еВ та 393,3 нм з енергією 3,15 еВ). Слід відзначити, що при цьому інтенсивні лінії Ca I, зокрема 362,4 нм з енергією збудження 5,30 еВ, 363,8 нм з енергією збудження 5,30 еВ та 364,4 нм з енергією збудження 5,30 еВ, не спостерігаються, незважаючи на значні значення добутку статистичної ваги на силу осцилятора, які становлять $0,89 \cdot 10^8$ та $1,8 \cdot 10^8$ с⁻¹ відповідно [8].

Важливою особливістю є те, що резонансна лінія Ca I (422,6 нм з енергією збудження 2,93 еВ), яка проявляється на 74 мкс, не спостерігається на спектрі поглинання до цього моменту часу. Це може бути пояснено тим, що частина верхніх рівнів атома Ca не реалізується через вплив швидкозмінних електричних мікрополів [12]. При цьому величина «оптичної щілини» становить 3,18 еВ, а концентрація електронів – $6 \cdot 10^{20}$ см⁻³.

Результати ототожнення спектра поглинання для даного режиму розряду наведено в таблиці.

Після отримання відповідних таблиць для кожного моменту часу визначають концентрацію електронів плазми, а за допомогою формул (1) і (2) обчислюються коефіцієнти її розпаду [13 - 15]:

$$K_p = 4,9 \cdot 10^{18} (N_e)^{-1,2}, \quad (1)$$

де K_p – коефіцієнт розпаду щільної плазми, с⁻¹·см³; N_e – концентрація електронів у плазмі, см⁻³ або:

$$K_p = \frac{\Delta N_e}{\Delta t \cdot N_e^2}, \quad (2)$$

де K_p – коефіцієнт розпаду плазми, N_e – концентрація електронів у плазмі, Δt – проміжок часу між визначеннями концентрацій, а N_e – верхнє значення концентрації електронів.

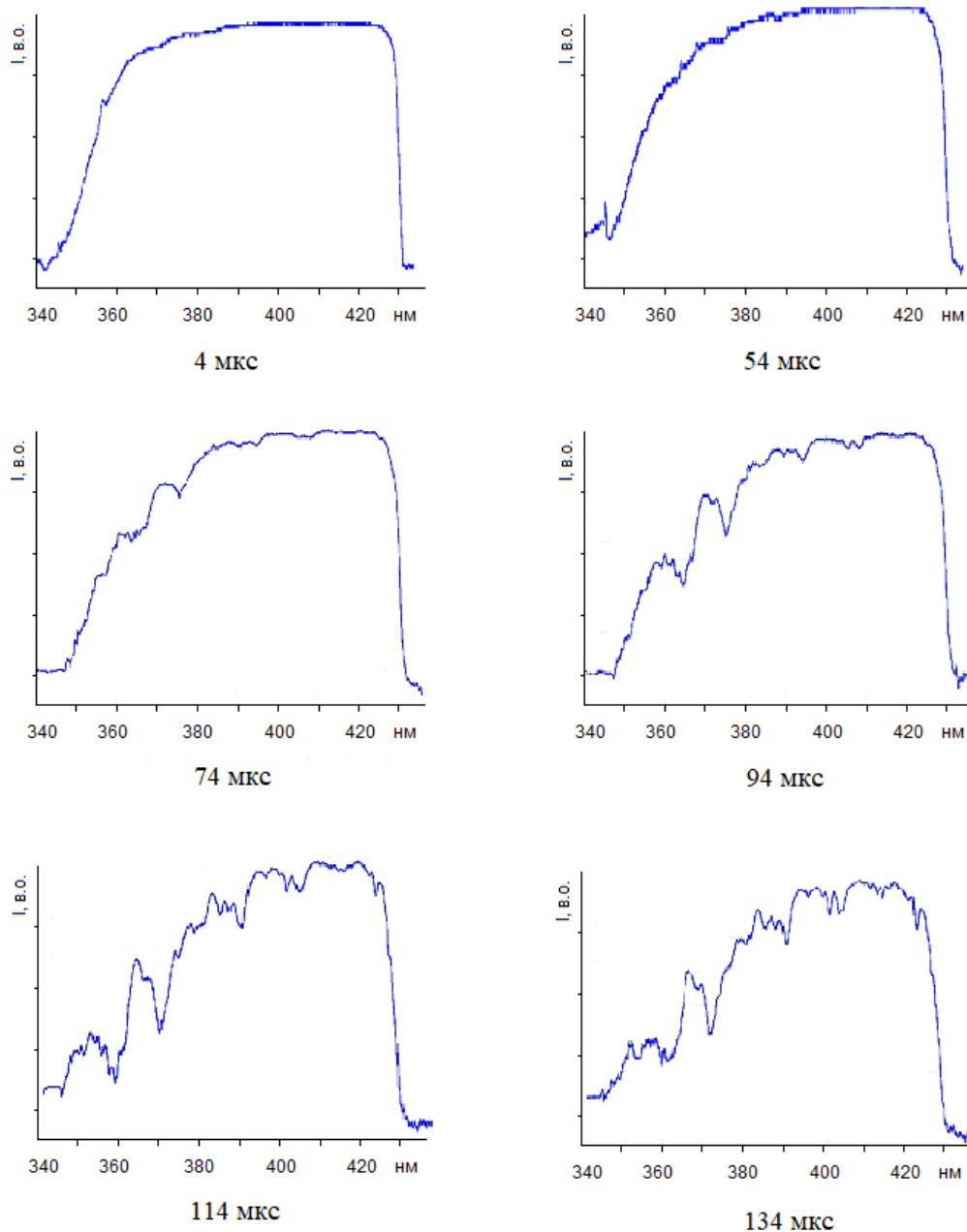


Рис. 6. Динаміка ділянки спектра (340 - 430 нм) щільної плазми ІРВ для ініціюючого провідника із заліза діаметром 160 мкм та довжиною 40 мм, $U = 37$ кВ, $C = 14,6$ мкФ, $L = 0,43$ мкГн.

Результати ототожнення спектра поглинання для режиму розряду з використанням залізного провідника діаметром 160 мкм

Довжина хвилі, нм	Матеріал	Потенціал збудження, еВ	Величина щілини, еВ	Концентрація, см ⁻³
339,8	Fe I	4,64	3,23	$5 \cdot 10^{20}$
351,6	Fe I	4,39	3,48	$5 \cdot 10^{20}$
352,1	Fe I	4,44	3,43	$6 \cdot 10^{20}$
363,1	Fe I	4,37	3,50	$5 \cdot 10^{20}$
368,0	Fe I	3,36	4,51	$2 \cdot 10^{21}$
368,3	Fe I	3,41	4,46	$2 \cdot 10^{20}$
370,1	Fe I	3,39	4,48	$2 \cdot 10^{21}$
370,2	Fe I	4,95	2,97	–
370,5	Fe I	3,39	4,48	$2 \cdot 10^{21}$
393,3	Ca II	3,15	8,74	–
396,8	Ca II	3,12	8,74	–
422,7	Ca I	2,93	3,18	$5 \cdot 10^{20}$

Слід відзначити, що з отриманих даних вибирається найменша концентрація з усього набору значень, що відображає вплив найменших усереднених мікрополів у плазмі та їхній вплив на нереалізацію верхніх рівнів у збудженому атомі. При цьому варто враховувати, що, як показано у роботах [16 - 20], коефіцієнт розпаду щільної плазми не залежить (як це спостерігається в розрідженій плазмі [21]) від її температури, ступеня неідеальності та не описується формулами для

бінарної та потрійної рекомбінації, а залежить лише від концентрації електронів.

Значення коефіцієнтів розпаду, отримані за допомогою формули (2), наведено на рис. 7 (точки 6 і 7). Суцільною лінією представлено залежність коефіцієнта розпаду щільної плазми від концентрації електронів, яка була отримана за допомогою емпіричної формули (1). Графік побудовано в подвійному логарифмічному масштабі.

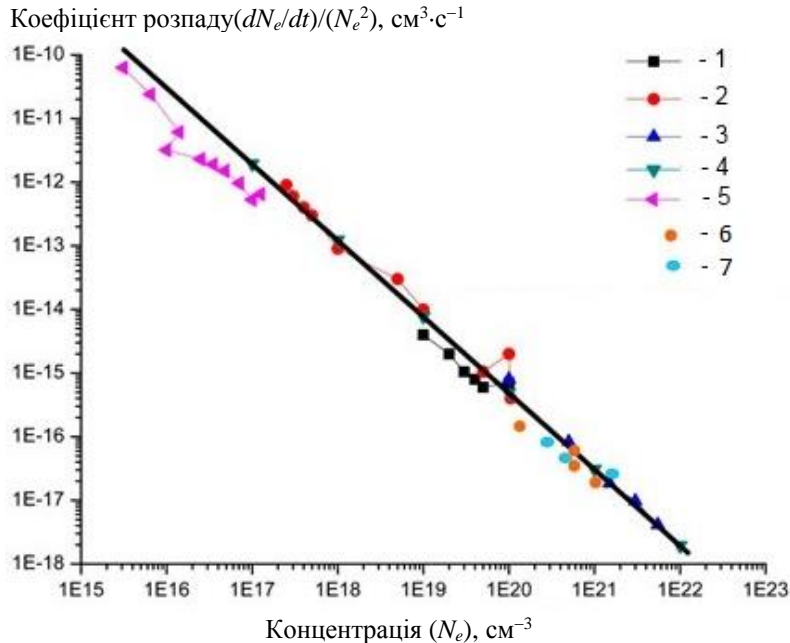


Рис. 7. Емпірична залежність коефіцієнтів розпаду щільної плазми від концентрації електронів. 1 – W, d = 20 мкм, l = 40 мм, U = 37 кВ; 2 – W, d = 20 мкм, l = 100 мм, U = 30 кВ; 3 – W, d = 320 мкм, l = 40 мм, U = 20 кВ; 4 – формула (1); 5 – [22]; 6 – Fe, d = 160 мкм, l = 40 мм, U = 37 кВ; 7 – Fe, d = 160 мкм, l = 40 мм, U = 20 кВ. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Як видно, результати узгоджуються з раніше отриманими коефіцієнтами розпаду щільної плазми для інших імпульсних високовольтних розрядів у воді, де розряд ініціювався електричним вибухом вольфрамового провідника.

5. Висновки

Проведені дослідження спектрів поглинання щільної плазми дали можливість проаналізувати динаміку їхньої зміни та встановити значення концентрації електронів у різні моменти часу під час розпаду плазмового каналу. При цьому зафіксовано зменшення концентрації електронів у щільній плазмі з плином часу та розширенням плазмового каналу з домішками атомів заліза.

Дослідження коефіцієнта розпаду щільної плазми з домішками заліза показало узгодженість отриманих результатів з результатами, що були отримані для плазми з домішками вольфраму при високих концентраціях електронів (10^{20} - 10^{21} см^{-3}). Це свідчить про типовість поведінки щільної плазми при високих концентраціях електронів. Отримані результати надають важливі відомості про динаміку плазми під час її розпаду, що дає змогу більш точно описувати і розуміти поведінку щільної плазми в різних фізичних системах, включаючи плазмові джерела, плазмові реактори та астрофізичні об'єкти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.Е. Фортов. *Уравнения состояния вещества от идеального газа до кварк-глюонной плазмы* (Москва: Физматлит, 2012) 492 с.
2. А.С. Коротеєв. *Ракетные двигатели и энергетические установки на основе газозафазного ядерного реактора*. (Москва: Машиностроение, 2002) 429 с.
3. О.А. Fedorovich, L.M. Voitenko. About the influence of the plasmas nonideality degree on the plasmas decay coefficients. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics* 1(83) (2013) 201.

4. Л.Л. Пасечник, П.Д. Старчик, О.А. Федорович. Временная эволюция спектров излучения плазмы в воде. В кн.: Сборник научных трудов. Под ред. Г.А. Гулого (К.: Наук. думка, 1987) с. 6.
5. Л.Л. Пасечник, П.Д. Старчик, О.А. Федорович. Измерение температуры плазмы подводного взрыва проволочек в условиях развитых нестабильностей в канале разряда. В кн.: Теория и практика электрогидравлического эффекта (К.: Наук. думка, 1978) с. 43.
6. Л.Л. Пасечник, П.Д. Старчик, О.А. Федорович. О составе плазмы и структуре плазменного канала импульсных разрядов в воде. В кн.: Сборник научных трудов. Под ред. Г.А. Гулого и др. (К.: Наук. думка, 1987) с. 3.
7. Ю.Н. Гороховский. *Свойства черно-белых фотографических пленок*. Сенситометрический справочник (Москва: Наука, 1968) 380 с.
8. Ч. Корлисс, У. Бозман. *Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. Таблицы*. Пер. с англ. О.Н. Митропольской (Москва: Мир, 1968) 562 с.
9. W.C. Martin et al. [Ground Levels and Ionization Energies for the Neutral Atoms](#). NIST Standard Reference Database 111.
10. В.К. Прокофьев и др. *Таблицы спектральных линий* (Москва: Наука, 1977) 800 с.
11. О.А. Федорович. Экспериментальные исследования оптических свойств НП в диапазоне концентраций электронов $10^{17} \text{ см}^{-3} \leq N_e \leq 1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$. [Теплофизика высоких температур](#) 52(4) (2014) 524.
12. Ю.К. Куриленков. О влиянии неидеальности на коэффициент рекомбинации плотной плазмы. [Теплофизика высоких температур](#) 18(6) (1980) 1312.
13. О.А. Федорович, Л.М. Войтенко. О коэффициентах распада неидеальной плазмы при взрыве вольфрамового проводника в воде. [Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения](#) 4(68) (2010) 354.
14. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. The empirical formula of dependence of factor of disintegration of nonideal plasma from electrons concentration. [Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics](#) 1(71) (2011) 122.
15. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. On the dense plasma decay within the electron concentration range of $10^{17} \text{ cm}^{-3} \leq N_e \leq 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. [Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration](#) 4(86) (2013) 217.
16. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. On features of the radiation from pulsed discharges initiated by thick wires in water. [Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics](#) 1(95) (2015) 161.
17. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. Dynamics of the emission spectrum of the hydrogen-oxygen plasma of pulsed discharge in water in the range of the Balmer series with a minimum of impurities. [Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration](#) 4(98) (2015) 189.
18. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. Experimental Researches of the Decay Coefficient of Nonideal Plasma Produced at Pulsed Discharges in Water. [Ukr. J. Phys.](#) 53(5) (2008) 450.
19. О.А. Федорович, Л.М. Войтенко. О коэффициентах распада неидеальной плазмы импульсных разрядов в воде при концентрациях электронов $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \geq N_e \geq 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. [Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения](#) 4 (2008) 288.
20. O.A. Fedorovich. About the “enlightenment” of nonideal hydrogen-oxygen plasma at a electrons’ concentration $N_e \leq 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. [Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics](#) 1(83) (2013) 198.
21. Л.М. Биберман, В.С. Воробьев, И.Т. Якубов. *Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы* (Москва: Наука, 1982) 376 с.
22. О.А. Малкин. *Импульсный ток и релаксация в газе* (Москва: Атомиздат, 1974) 280 с.

O. A. Fedorovich^{1,*}, L. M. Voitenko¹, V. V. Hladkovskiy², O. V. Hladkovska¹

¹ *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

² *Presidium of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: oafedorovich@kinr.kiev.ua

DECAY CHARACTERISTICS OF DENSE HIGH-VOLTAGE PULSE PLASMA DISCHARGES IN WATER INITIATED BY THE ELECTRIC EXPLOSION OF IRON CONDUCTOR

The article presents the results of investigations of the decay coefficients of dense plasma in impulse discharges in water initiated by an electric explosion of an iron conductor. An analysis of time-resolved and spatial emission spectra of the discharges was performed, along with the study of absorption spectra dynamics with a 5 μs interval. The electron concentration of the dense plasma was determined at different time points, allowing the determination of its decay coefficients at electron concentrations ranging from 10^{20} to 10^{21} cm^{-3} . It was found that under equal electron concentrations in the plasma, the decay coefficients of plasma with iron impurities are consistent with the decay coefficients of plasma with tungsten impurities.

Keywords: dense plasma, electrons concentration, decay coefficient, pulse discharge in water, radiation spectra, impurities of metal atoms, spectrum sweeps, dynamics of optical spectra.

REFERENCES

1. V.E. Fortov. *Equations of State for Matter from Ideal Gas to Quark-Gluon Plasma* (Moskva: Fizmatlit, 2012) 492 p. (Rus)
2. A.S. Koroteev. *Rocket Engines and Power Plants Based on a Gas-Phase Nuclear Reactor* (Moskva: Mashinostroenie, 2002) 429 p. (Rus)
3. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. About the influence of the plasmas nonideality degree on the plasmas decay coefficients. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics 1(83)* (2013) 201.
4. L.L. Pasechnik, P.D. Starchik, O.A. Fedorovich. Temporal evolution of plasma emission spectra in water. In: *Collection of Scientific Works*. G.A. Gulyi (Ed.) (Kyiv: Naukova Dumka, 1987) p. 6. (Rus)
5. L.L. Pasechnik, P.D. Starchik, O.A. Fedorovich. Measuring the plasma temperature of an underwater explosion of wires under conditions of developed instabilities in the discharge channel. In: *Theory and Practice of the Electrohydraulic Effect* (Kyiv: Naukova Dumka, 1978) p. 43. (Rus)
6. L.L. Pasechnik, P.D. Starchik, O.A. Fedorovich. On the composition of plasma and the structure of the plasma channel of pulsed discharges in water. In: *Collection of Scientific Works*. G.A. Gulyi et al. (Eds.) (Kyiv: Naukova Dumka, 1987) p. 3. (Rus)
7. Yu.N. Gorokhovskiy. *Properties of Black and White Photographic Films*. Sensitometric Reference Book (Moskva: Nauka, 1968) 380 p. (Rus)
8. C. Corliss, W. Bozman. *Transition probabilities and oscillator strengths of 70 elements. Tables*. Transl. from Eng. by O.N. Mitropolskaya (Moskva: Mir, 1968) 562 p. (Rus)
9. W.C. Martin et al. *Ground Levels and Ionization Energies for the Neutral Atoms*. NIST Standard Reference Database 111.
10. V.K. Prokofiev et al. *Tables of Spectral Lines* (Moskva: Nauka, 1977) 800 p. (Rus)
11. O.A. Fedorovich. Experimental studies of the optical properties of NP in the electron concentration range $10^{17} \text{ cm}^{-3} \leq N_e \leq 1 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. *Teplofizika Vysokikh Temperatur 52(4)* (2014) 524. (Rus)
12. Yu.K. Kurilenkov. On the influence of nonideality on the recombination coefficient of dense plasma. *Teplofizika Vysokikh Temperatur 18(6)* (1980) 1312. (Rus)
13. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. About factors of disintegration of nonideal plasma at explosion of the tungstic conductor in water. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration 4(68)* (2010) 354. (Rus)
14. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. The empirical formula of dependence of factor of disintegration of nonideal plasma from electrons concentration. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics 1(71)* (2011) 122.
15. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. On the dense plasma decay within the electron concentration range of $10^{17} \text{ cm}^{-3} \leq N_e \leq 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration 4(86)* (2013) 217.
16. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. On features of the radiation from pulsed discharges initiated by thick wires in water. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics 1(95)* (2015) 161.
17. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. Dynamics of the emission spectrum of the hydrogen-oxygen plasma of pulsed discharge in water in the range of the Balmer series with a minimum of impurities. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration 4(98)* (2015) 189.
18. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. Experimental Researches of the Decay Coefficient of Nonideal Plasma Produced at Pulsed Discharges in Water. *Ukr. J. Phys. 53(5)* (2008) 450.
19. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. About factors disintegration of nonideal plasma of pulse discharges in water at electrons concentration $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3} \geq N_e \geq 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Electronics and New Methods of Acceleration 4* (2008) 288. (Rus)
20. O.A. Fedorovich. About the “enlightenment” of nonideal hydrogen-oxygen plasma at a electrons’ concentration $N_e \leq 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics 1(83)* (2013) 198.
21. L.M. Biberman, V.S. Vorobiev, I.T. Yakubov. *Kinetics of Nonequilibrium Low-Temperature Plasma* (Moskva: Nauka, 1982) 376 p. (Rus)
22. O.A. Malkin. *Pulsed Current and Relaxation in Gas* (Moskva: Atomizdat, 1974) 280 p. (Rus)

Надійшла/Received 28.06.2023