

**В. В. Гладковський<sup>1</sup>, В. Г. Панченко<sup>2</sup>, П. В. Порицький<sup>2</sup>,  
О. А. Федорович<sup>2</sup>, Л. М. Войтенко<sup>2</sup>, Л. М. Свята<sup>2,\*</sup>**

<sup>1</sup> Національна академія наук України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

\*Відповідальний автор: lsvjat@kinr.kiev.ua

## ПРО ВПЛИВ МЕТАЛЕВИХ ДОМІШОК НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ЩІЛЬНОЇ ПЛАЗМИ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ У ВОДІ

Розглянуто вплив домішок металів на електропровідність щільної плазми імпульсних розрядів у воді. Проведені розрахунки електропровідності ґрунтувалися на методі моментів Греда. Показано, що невелика кількість металевих домішок може суттєво змінити величину коефіцієнта електропровідності плазми порівняно з випадком чистої водяної пари. Виявлено, що металеві домішки можуть спричинити як збільшення, так і зменшення електропровідності плазми, що пов'язано із процесами міжчастинкових зіткнень та наявністю кластерів.

*Ключові слова:* щільна плазма, імпульсний розряд, розряд у воді, електропровідність плазми, переріз зіткнення, кластер.

### 1. Вступ

Імпульсні електричні розряди широко використовуються в енергетиці, металургії, нафтогазовій галузі та суднобудуванні [1 - 7]. Водночас такі розряди мають місце в електророзрядних технологічних процесах, таких, як електрозварювання, штампування, очищення литва та дроблення порід. Крім того, інтерес до вивчення таких розрядів зростає завдяки розвитку нових технологій, пов'язаних з переробкою відходів, очищенням води та новими напрямками водневої енергетики [3 - 7].

Плазма розрядів у воді містить не лише розчинені речовини, але й матеріал електродів та провідників, через які підводиться струм до плазми або які використовуються для ініціювання розрядів. Ці домішки можуть значно впливати на властивості воднево-кисневої плазми, спричиняючи зміни у розподілі струму та енерговиділенні в розрядних каналах, а також впливати на формування структури і динаміку розвитку розрядного каналу [7, 8].

У багатокомпонентному плазмовому середовищі через велику кількість різнотипових міжчастинкових взаємодій перебіг процесів значно ускладнюється. Властивості плазми з домішками металів суттєво залежать від її складу [8 - 12]. Характерні особливості транспортних властивостей термічної плазми водяної пари без домішок розглянуто у [8 - 10]. Поява металевих домішок може призводити до підвищення провідності та густини енергії у плазмі внаслідок збільшення густини носіїв заряду завдяки значно нижчим

потенціалам іонізації атомів металів порівняно з атомами водяного середовища. З іншого боку, для низькотемпературної плазми важливими є процеси взаємодії електронів з нейтральними частинками [11, 12]. Адже ці процеси також можуть впливати на електропровідність, тому необхідно приділити їм особливу увагу.

Мідь та вольфрам є одними з найбільш широко використовуваних електротехнічних матеріалів і тому часто стають складовими плазмового середовища розрядів у воді. Метою даної роботи є дослідження впливу фізичних характеристик плазми імпульсних розрядів у воді, а саме суміші водяної пари з парами металів (міді та вольфраму), на електропровідність плазми.

### 2. Електропровідність багатокомпонентної пароводяної плазми з домішками парів металів

Розглянемо щільну плазму, що знаходиться в стані локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) (див. [10 - 12]). Внаслідок високих концентрацій нейтралів і електронів процеси зіткнень у такій плазмі значно більш впливові, ніж процеси перенесення частинок та радіаційні процеси в локальному об'ємі. Для багатокомпонентної низькотемпературної плазми, в якій підтримується ЛТР, компонентний склад можна вирахувати, виходячи із закону діючих мас, що також відображає реакційні процеси. Зокрема, концентрація електронів у даній точці розряду зв'язана з концентраціями іонів та нейтральних частинок рівнянням Саха.

© В. В. Гладковський, В. Г. Панченко, П. В. Порицький,  
О. А. Федорович, Л. М. Войтенко, Л. М. Свята, 2024

Визначення складу плазми дає змогу розрахувати її транспортні властивості. У розрахунках будемо використовувати метод Греда [12 - 14]. Зазначимо, що у [12] була показана застосовність методу Греда до задач частково іонізованої плазми та проведено порівняння із більш поширеним методом Чепмена - Енскога [15, 16].

Обидва методи ґрунтуються на формалізмі інтегралів Чепмена - Каулінга [14 - 16]:

$$\Omega_{\alpha\beta}^{lr} = \left( \frac{kT}{2\pi\mu_{\alpha\beta}} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\infty} \zeta^{2r+3} e^{-\zeta^2} Q_{\alpha\beta}^{(l)}(\zeta) d\zeta, \quad (1)$$

де  $k$  - стала Больцмана,  $T$  - температура,  $\mu_{\alpha\beta}$  - зведена маса частинок сортів  $\alpha$  та  $\beta$ , які беруть

участь у зіткненні,  $\zeta = \left( \frac{\mu_{\alpha\beta}}{2} kT \right)^{\frac{1}{2}} g$ ,  $g$  - відносна

швидкість. Транспортний переріз порядку  $l$  визначається як  $Q_{\alpha\beta}^l(g) = 2\pi \int_0^{\pi} \sigma_{\alpha\beta}(g, \chi) \times (1 - \cos^l \chi) \sin \chi d\chi$ , де  $\chi$  - кут розсіяння,  $\sigma_{\alpha\beta}(g, \chi)$  - диференціальний переріз розсіяння.

У 13-моментному (13М) наближенні методу Греда трансляційні транспортні коефіцієнти вираховуються як сума ефективних коефіцієнтів для кожного сорту частинок. А самі ефективні коефіцієнти вираховуються, виходячи з певної комбінації інтегралів Чепмена - Каулінга (1). Зазначимо, що електропровідність щільної низькотемпературної плазми визначається головним чином електронами внаслідок високої густини плазмового середовища. Розрахунок електронних транспортних коефіцієнтів потребує застосування більш високих апроксимацій. Так електропровідність  $\sigma$  можна записати як [12, 14, 16]

$$\sigma = \frac{3}{2} n_e^2 e^2 \left( \frac{2\pi}{m_e kT} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{|q'|}{|q|}, \quad (2)$$

де  $m_e$  - маса електрона,  $n_e$  - густина електронів у плазмі, а елементи детермінантів  $q$ ,  $q'$  є функціями зазначених вище інтегралів Чепмена - Каулінга (детальніше див. [12, 14, 16]).

Із формули (2) випливає, що електропровідність низькотемпературної плазми головним чином залежить від густини плазми (кількості носіїв заряду) та процесів міжчастинкової взаємодії (частоти зіткнень). Оскільки атоми металів мають значно нижчий потенціал іонізації порівняно із атомами водного середовища, то введення атомів металів у канал розряду викликає збіль-

шення густини плазми, що є однозначно чинником зростання електропровідності. З іншого боку, характеристики міжчастинкових зіткнень можуть мати складний характер і ці процеси можуть загалом зумовлювати як зростання так і зменшення електропровідності плазми. Умови для останнього розглянемо далі більш докладно.

Найбільш детально для низьких енергій досліджено розсіяння електрона на атомі міді [17 - 19]. Різні моделі перерізу електрон-атомних зіткнень для міді та результати використання їх до моделювання газорозрядної плазми обговорюються у [18]. Поширеними є такі моделі перерізу розсіяння електронів низьких енергій на атомі міді: резонансна модель [17] (найбільш поширена та застосовна), що характеризується наявністю резонансу поблизу 0,1 еВ, та нерезонансна модель без такого резонансу [18]. Проте потім з'явилися розрахунки за новою альтернативною моделлю [19], що також характеризується наявністю резонансу, але зі зсувом у бік більш високих енергій.

До розрахунків плазми суміші водяної пари із міддю використовуємо такий набір із 16 частинок:  $e^-$ ,  $H_2O$ ,  $H_2O^+$ ,  $H_2$ ,  $H_2^+$ ,  $OH$ ,  $OH^+$ ,  $O_2$ ,  $O_2^+$ ,  $H$ ,  $H^+$ ,  $O$ ,  $O^+$ ,  $Cu$ ,  $Cu^+$ ,  $Cu^{2+}$ . Аналогічний набір частинок використовуємо також для сумішей із вмістом вольфраму. Результати розрахунків для пароводяної плазми із домішками наведено на рис. 1 і 2.

Можна бачити, що результати розрахунку величини електропровідності пароводяної плазми із домішками міді суттєво залежать від моделі перерізу  $e^- + Cu$ . Так у випадку застосування нерезонансної моделі розсіяння [18] (відносно мала величина перерізу) маємо неперервне зростання електропровідності з ростом температури внаслідок збільшення концентрації електронів завдяки термічній іонізації. Навпаки, у випадку застосування резонансної моделі розсіяння [17] (відносно велика величина перерізу) зростання електропровідності уповільнюється порівняно із результатами для попередньої моделі розсіяння. Більш того, електрична провідність може навіть зменшуватися з ростом температури внаслідок збільшення ефективної частоти зіткнень завдяки гальмуванню електронів на атомах міді. Крім того, зазначимо, що застосування альтернативної моделі перерізу [19] дає проміжний результат між вказаними випадками. Отже, є потенційна можливість додаванням досить великої кількості домішки з певними властивостями отримати зменшення електропровідності у багатокомпонентній плазмі розрядів.

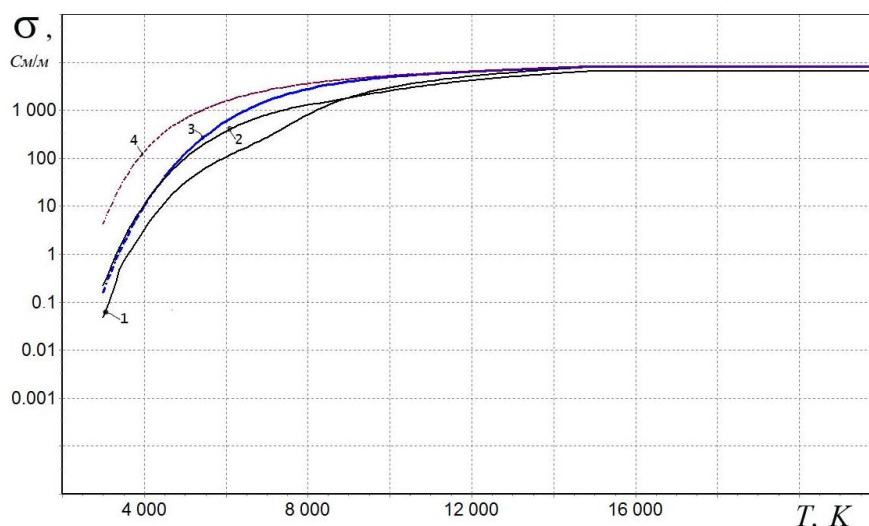


Рис. 1. Електропровідність плазми пароводяної суміші із вмістом міді зі сталим молярним співвідношенням (тиск  $p = 10$  бар). 1 – чиста водяна пара; 2 –  $H_2O:Cu$  (90:10) (резонансна модель перерізу  $e^- + Cu$  [17]); 3 –  $H_2O:Cu$  (90:10) (альтернативна модель перерізу  $e^- + Cu$  [19]); 4 –  $H_2O:Cu$  (90:10) (нерезонансна модель перерізу  $e^- + Cu$  [18]).

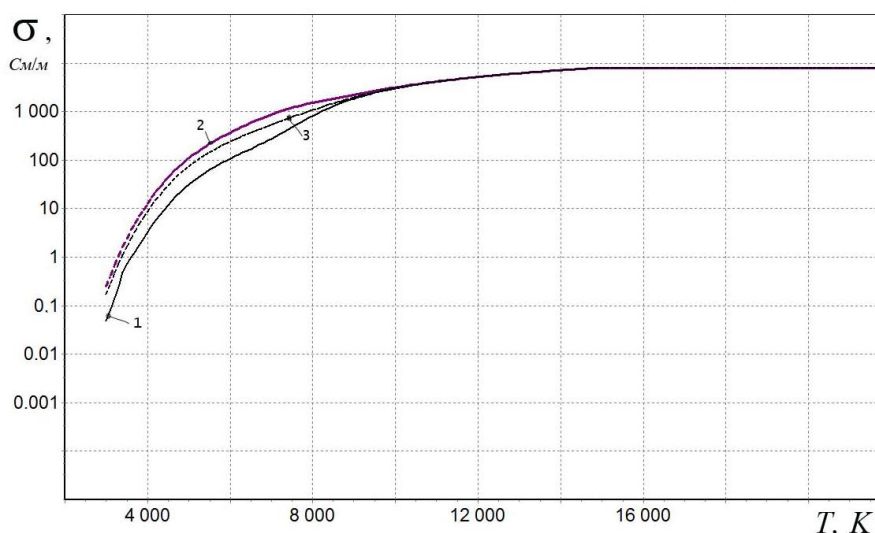


Рис. 2. Електропровідність плазми пароводяної суміші із вмістом вольфраму зі сталим молярним співвідношенням (тиск  $p = 10$  бар). 1 – чиста водяна пара; 2 –  $H_2O:W$  (90:10); 3 –  $H_2O:W$  (90:10) (суміш із наявністю кластерів).

Результати розрахунків для пароводяної плазми із домішками вольфраму наведено на рис. 2. При подібному складі плазми маємо результати для вольфраму аналогічні до випадку міді. Проте, слід зазначити, що для такого тугоплавкого металу як вольфрам характерно утворення кластерів у розрядній плазмі. Склад плазми внаслідок протікання процесів асоціації атомів вольфраму у кластери  $W+W_n = W_{n+1}$  доповнюються частинками, які мають розміри більші за молекули та радикали пароводяного середовища. Відповідно, кластери мають більший переріз розсіяння для низькоенергетичних електронів, що спричиняє зміну інтегральних характеристик міжчастинкових взаємодій у плазмі. Врахування наявності кластерів ( $n = 2 \div 24$ ) дає зменшення електропровідності плазми (див. рис. 2). Отже, наявність у багато-

компонентній плазмі розрядів кластерів також може являти собою чинник зменшення електропровідності.

### 3. Вимірювання електропровідності плазми імпульсних розрядів

Вплив металевих домішок на властивості плазми імпульсних розрядів у воді експериментально досліджено шляхом ініціювання електричного вибуху металевого провідника при пропусканні через нього імпульсного струму високої густини [20]. При використанні «тонких» провідників діаметром до 20 мкм, у спектрі плазми найбільш інтенсивними є лінії водню на активній фазі розряду. Зі збільшенням діаметра провідників у спектрі випромінювання домінуючими стають лінії матеріалу провідника.

Питома електропровідність щільної плазми електричного розряду у воді визначалася на основі часових змін опору плазми та радіуса розрядного каналу. Для розрахунку електропровідності використовувалося усереднення декількох вимірювань опору та радіуса каналу. Провідність, усереднена по об'єму, розраховувалася для порівняно великої міжелектродної відстані ( $l = 40$  мм). Усереднення по об'єму проводилося з урахуванням того, що різниця яскравісних температур незначна вздовж осі каналу і не перевищує  $(3 \div 4) \cdot 10^3$  К, а променева теплопровідність та висока частота зіткнень повинні призводити до вирівнювання температур по перерізу розрядного каналу. Цьому явищу сприяє «ефект щілини», що виникає у щільній неідеальній плазмі [21 - 24].

Крім того, має відбуватися перерозподіл енергії поглинання в спектрах у бік вищих частот, що при температурах  $T = (10 \div 50) \cdot 10^3$  К повинно призводити до швидкого вирівнювання температури по перерізу каналу. Виходячи з цього, будемо вважати, що струм розподілений практично рівномірно у перерізі розрядного каналу при швидкому введенні енергії. Розрахунки провідності будемо проводити для таких режимів.

Результати розрахунків усередненої по об'єму питомої електропровідності плазмових каналів залежно від часу тривалості розряду наведено на рис. 3 - 6. Можна бачити, що максимальне значення електропровідності спостерігається в першому напівперіоді розряду, коли відбувається інтенсивне введення енергії в канал і нагрівання плазми до температур  $T = (10 \div 50) \cdot 10^3$  К. З плином часу електропровідність плазми зменшується, що корелює з характером поведінки яскравісної температури з часом.

При вивченні впливу домішок міді та воль-

фраму на властивості плазми, ініційованої електричним вибухом провідника, використовувалися провідники діаметром  $160 \div 180$  мкм. Для детального дослідження впливу домішок вольфраму на електропровідність використовувалися провідники діаметром від 20 до 500 мкм. Це відповідає кількості атомів металу на одиницю довжини каналу  $N_a = 2 \cdot 10^{17} \div 1,25 \cdot 10^{20}$  атом/см. Міжелектродна відстань становила  $l = 40$  мм, напруга  $U$  вибиралася 20 та 37 кВ. Період розряду становив  $t = 15,5$  мкс при ємності  $C = 14,6 \pm 0,2$  мкФ та індуктивності  $L = 0,43$  мкГн розрядного контура. Вимірювалися вольт-амперні та просторово-часові характеристики плазмового каналу з прив'язкою до часу.

Результати розрахунків усередненої по об'єму питомої електропровідності плазми розрядів показують, що електропровідність залежить як від типу металевої домішки (див. рис. 3), так і від її кількості у розрядному каналі (див. рис. 4). При цьому зміна величини енерговкладення не впливає на загальну динаміку електропровідності залежно від концентрації металевих домішок у плазмі (див. рис. 6). Зазначимо, що це справедливо для відносно великої міжелектродної відстані  $l = 40$  мм. При зменшенні цієї відстані зростає роль приелектродних процесів. Можливе також внесення додаткових домішок у розрядний канал через ерозію та випаровування електродів, а також появу катодних і анодних струменів.

Також з представлених результатів (див. рис. 4 - 6) видно, що збільшення концентрації металевої домішки (вольфрам) у плазмі розрядного каналу призводить до суттєвого зменшення величини електропровідності. При цьому на ранніх стадіях розряду електропровідність вища, ніж на пізніших стадіях.

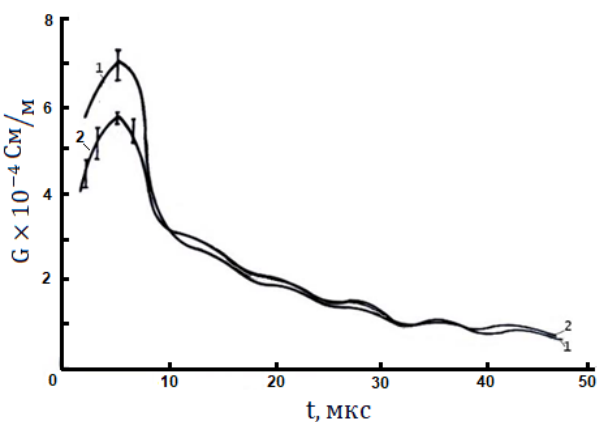


Рис. 3. Електропровідність плазми імпульсного розряду у воді залежно від часу та матеріалу провідника ( $U = 37$  кВ,  $l = 40$  мм,  $L = 0,43$  мкГн). 1 – W ( $d = 160$  мкм), 2 – Cu ( $d = 180$  мкм).

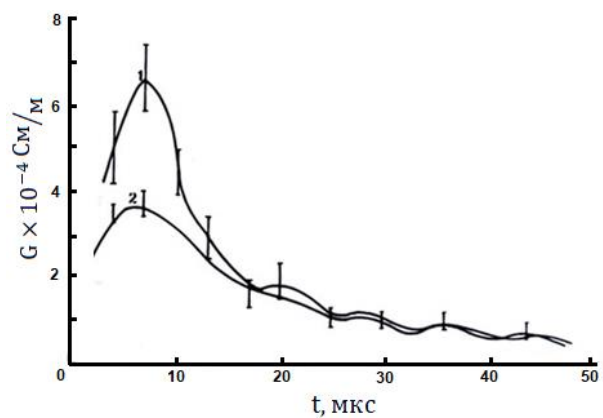


Рис. 4. Електропровідність плазми імпульсного розряду у воді залежно від часу для вольфрамового провідника ( $U = 37$  кВ,  $l = 40$  мм,  $L = 0,43$  мкГн). 1 – W ( $d = 20$  мкм), 2 – W ( $d = 300$  мкм).

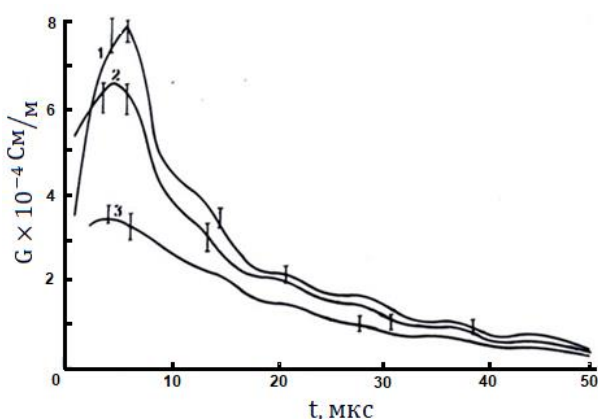


Рис. 5. Електропровідність плазми імпульсного розряду у воді залежно від часу для вольфрамового провідника ( $U = 37$  кВ,  $l = 40$  мм,  $L = 0,43$  мкГн). 1 – W ( $d = 75$  мкм), 2 – W ( $d = 160$  мкм), 3 – W ( $d = 500$  мкм).

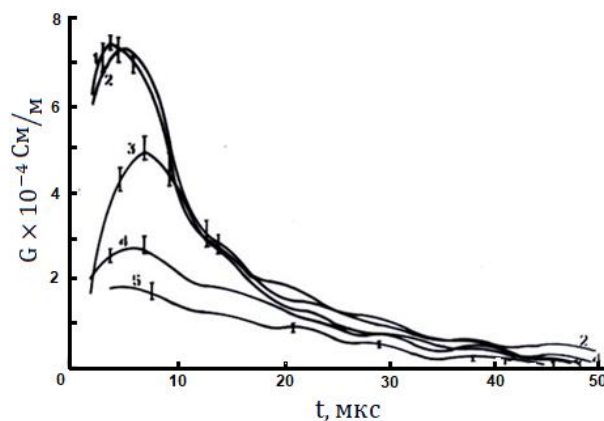


Рис. 6. Електропровідність плазми імпульсного розряду у воді залежно від часу для вольфрамового провідника ( $U = 20$  кВ,  $l = 40$  мм,  $L = 0,43$  мкГн). 1 – W ( $d = 20$  мкм), 2 – W ( $d = 75$  мкм), 3 – W ( $d = 160$  мкм), 4 – W ( $d = 300$  мкм), 5 – W ( $d = 500$  мкм).

#### 4. Обговорення результатів

Проведені розрахунки та результати експериментів показують, що металеві домішки можуть суттєво впливати на величину електропровідності плазми імпульсних розрядів у воді порівняно з розрядом у водному середовищі без домішок. Адже метали мають значно нижчий потенціал іонізації порівняно з молекулами води. Тому введення металевих домішок призводить до збільшення ступеня іонізації плазми. У щільній плазмі, внаслідок термічної іонізації, це призводить до зростання кількості носіїв заряду, і якщо немає інших значних чинників, спостерігається типова картина: введення металевих домішок підвищує густину та електропровідність плазми.

З іншого боку, деякі металеві домішки можуть знижувати електропровідність плазми. Це може відбуватися, якщо домішки мають певні властивості, зокрема великий переріз розсіяння електронів низьких енергій на атомах металу. Такі властивості притаманні лише окремим металам. Отже, зменшення електропровідності при введенні домішок спостерігається тільки за умови присутності в суміші лише певних металевих компонентів.

Зазначимо, що існують значні розбіжності в значеннях транспортних властивостей багатоконпонентної плазми електричних розрядів із вмістом міді, які розраховані за різними моделями транспортного перерізу розсіяння електронів на атомах міді. Ці розбіжності ускладнюють точне моделювання та прогнозування поведінки такої плазми. Так, маємо розбіжності в розрахункових та експериментальних величинах електропровідності для початкової стадії розряду (див. рис. 1 - 6). Відзначимо, що початкова стадія імпульсного розряду характеризується високими тисками та підвищеним енерговкладенням у пла-

зму розряду [20]. Внаслідок цього плазма розряду може містити більш високо іонізовані іони, ніж припускалося в розрахунковій моделі. Крім того, в умовах підвищеного тиску більш сильно можуть бути проявлені ефекти неідеальності плазми [21 - 25]. Тому для кращого розуміння та узгодження результатів, необхідні додаткові дослідження, які б враховували різні фактори та умови експериментів. Зокрема, слід детальніше вивчити вплив концентрації мідних домішок, температурних умов та інших параметрів на електропровідність та інші транспортні властивості плазми. Отже, характеристики плазми електричних розрядів із вмістом парів міді потребують подальшого вивчення, що дасть змогу розробити більш точні моделі та поліпшити наші знання про цей процес.

Зменшення електропровідності також може бути зумовлене наявністю кластерів у плазмі, що є досить поширеним явищем для плазмових середовищ із вмістом міді та вольфраму [25 - 36]. Кластери спостерігаються як у пристроях з низькотемпературною плазмою, так і з високотемпературною. Тому ефект зменшення електропровідності можна використовувати для зміни властивостей плазми в широкому діапазоні температур.

Зазначимо також, що на властивості щільної плазми можуть впливати ефекти неідеальності, які враховуються по-різному в різних моделях плазми [21 - 25], що призводить до розбіжних результатів залежно від густини плазми. Використаний у даній роботі підхід [12, 14 - 16] у граничному випадку нульової густини зводиться до формули Спітцера для електропровідності плазми [37, 38]. Крім того, мають місце певні особливості залежно від типу та геометрії розряду. Так, для плазми квазістаціонарного розряду в

атмосфері з каналом радіуса  $\sim 3$  мм, тепло- та електропровідність плазми, які визначаються домішкою міді, є доволі різкою функцією від радіальної координати [39].

Отже, електропровідність плазми імпульсних розрядів у воді може бути як збільшена, так і зменшена введенням металевих домішок. Це відкриває можливості для цілеспрямованого керування властивостями таких розрядів.

## 5. Висновки

Наведені результати дослідження показують, що навіть невеликі кількості металевих домішок можуть суттєво змінити транспортні коефіцієнти плазми імпульсних розрядів порівняно з розрядом у водному середовищі без домішок. Властивості багатокомпонентної плазми, що містять домішки металів, значною мірою залежать від перерізу розсіяння електронів на атомах металів,

які визначають ефективність взаємодії електронів з атомами домішок, що впливає на загальну електропровідність й інші транспортні властивості плазми.

Плазмово-пароводяне середовище із вмістом металевих кластерів суттєво відрізняється своїми властивостями від такого середовища без домішок. Металеві домішки можуть як підвищувати, так і знижувати електропровідність плазми, залежно від їхніх характеристик і концентрації. Це відкриває можливості для цілеспрямованого керування властивостями плазми, що може бути використано в різних прикладних сферах.

Зазначимо, що подальші дослідження необхідні для точнішого моделювання і прогнозування поведінки багатокомпонентної плазми з металевими домішками, враховуючи різні фактори, такі як концентрація домішок, температурні умови та інші параметри.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. P. Šunka. Pulse electrical discharges in water and their applications. *Phys. Plasmas* 8(5) (2001) 2587.
2. B.R. Locke, S.M. Thagard. Analysis and review of chemical reactions and transport processes in pulsed electrical discharge plasma formed directly in liquid water. *Plasma Chem. Plasma Process.* 32(5) (2012) 875.
3. V.A. Zhovtyansky et al. Efficiency of renewable organic raw materials conversion using plasma technology. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 41(12) (2013) 3233.
4. I. Prysiazhnevych et al. Physical features of atmospheric pressure microdischarge system with vortex gas flows. *Open Chemistry* 13 (2025) 420.
5. I. Hirka, O. Živný, M. Hrabovský. Numerical Modelling of Wood Gasification in Thermal Plasma Reactor. *Plasma Chem. Plasma Process.* 37(4) (2017) 947.
6. H. Akiyama, M. Akiyama. Pulsed Discharge Plasmas in Contact with Water and their Applications. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 16 (2021) 6.
7. Y. Chai et al. Free and Wire-Guided Spark Discharges in Water: Pre-Breakdown Energy Losses and Generated Pressure Impulses. *Energies* 16(13) (2023) 4932.
8. P.V. Porytskyu, P.D. Starchyk. Influence of metal impurities on the transport properties of multicomponent plasma of underwater discharges. *Ukr. J. Phys.* 61(8) (2016) 709.
9. P. Křenek. Thermophysical properties of H<sub>2</sub>O-Ar plasmas at temperatures 400 - 50,000 K and pressure 0.1 MPa. *Plasma Chem. Plasma Process.* 28(1) (2008) 107.
10. J. Aubreton, M.F. Elchinger, J.M. Vinson. Transport coefficients in water plasma: Part I: Equilibrium plasma. *Plasma Chem. Plasma Process.* 29(2) (2009) 149.
11. P. Porytsky et al. On the application of the theory of Lorentzian plasma to calculation of transport properties of multicomponent arc plasmas. *Eur. Phys. J. D* 57(1) (2010) 77.
12. P. Porytsky et al. Transport properties of multicomponent thermal plasmas: Grad method versus Chapman-Enskog method. *Phys. Plasmas* 20(2) (2013) 023504.
13. H. Grad. On the kinetic theory of rarefied gases. *Commun. Pur. Appl. Math.* 2(4) (1949) 331.
14. V.M. Zhdanov. *Transport Processes in Multicomponent Plasma* (London: CRC Press, 2002) 296 p.
15. R.S. Devoto. Transport properties of ionized monoatomic gases. *Phys. Fluids* 9(6) (1966) 1230.
16. R.S. Devoto. Simplified expressions for the transport properties of ionized monoatomic gases. *Phys. Fluids* 10(10) (1967) 2105.
17. K.F. Scheibner, A.U. Hazi, R.J.W. Henry. Electron-impact excitation cross sections for transitions in atomic copper. *Phys. Rev. A* 35(11) (1987) 4869(R).
18. B. Chervy et al. The influence of the cross section of the electron-copper atom collision on the electrical conductivity of Ar-Cu and SF<sub>6</sub>-Cu plasmas. *J. Phys. D* 28(10) (1995) 2060.
19. O. Zatsarinny et al. Electron-impact excitation of the (3d<sup>10</sup>4s)<sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> → (3d<sup>9</sup>4s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>D<sub>5/2,3/2</sub> transitions in copper atoms. *Phys. Rev. A* 81(6) (2010) 062705.
20. O.A. Fedorovich et al. Decay characteristics of dense high-voltage pulse plasma discharges in water initiated by the electric explosion of iron conductor. *Nucl. Phys. At. Energy* 24(4) (2023) 351. (Ukr)
21. H.E. Wilhelm. Electrical conductivity of nonideal plasma. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 9(2) (1981) 68.
22. G. Norman, A. Valuev. Electrical conductivity of nonideal plasma. *Plasma Physics* 21(6) (1979) 531.
23. V.A. Alekseev, I.T. Iakubov. Non-ideal plasmas of metal vapours. *Phys. Rep.* 96(1) (1983) 1.
24. I.T. Iakubov, V.V. Pogosov. Towards a theory of self-compressed metallic clusters. Model of stabilized jellium. *Physica A* 214(2) (1995) 287.

25. O. Coufal, O. Živný. Composition and thermodynamic properties of thermal plasma with condensed phases. *Eur. Phys. J. D* 61 (2011) 131.
26. O. Coufal, P. Sezemský, O. Živný. Database system of thermodynamic properties of individual substances at high temperatures. *J. Phys. D* 38 (2005) 1265.
27. S. Xue, M. Boulos. Transient heating and evaporation of metallic particles under plasma conditions. *J. Phys. D* 52 (2019) 454002.
28. G.D. Dhamale et al. Modelling and experimental investigations of composition-dependent heat and mass transfer during Cu-Ni alloy nanoparticle synthesis in a transferred arc helium plasma. *J. Phys. D* 55 (2022) 375203.
29. M. Boselli, M. Gherardi, V. Colombo. 3D modelling of the synthesis of copper nanoparticles by means of a DC transferred arc twin torch plasma system. *J. Phys. D* 52 (2019) 444001.
30. A.B. Murphy, D. Uhrlandt. Foundations of high-pressure thermal plasmas. *Plasma Sources Sci. Technol.* 27 (2018) 063001.
31. V. Aubrecht, M. Bartlova, O. Coufal. Radiative emission from air thermal plasmas with vapour of Cu or W. *J. Phys. D* 43 (2010) 434007.
32. B. Chervy. The influence of the presence of tungsten on SF<sub>6</sub> arc plasmas. *J. Phys. D* 29 (1996) 2156.
33. S. Peillon et al. Dust sampling in WEST and tritium retention in tokamak-relevant tungsten particles. *Nuclear Materials and Energy* 24 (2020) 100781.
34. C. Arnas et al. Micron-sized dust and nanoparticles produced in the WEST tokamak. *Nuclear Materials and Energy* 36 (2023) 101471.
35. V.I. Vishnyakov. Ionization balance in low-temperature plasmas with nanosized dust. *Ukr. J. Phys.* 66(4) (2021) 303.
36. V.I. Vishnyakov et al. Formation of particles in welding fume plasmas: Numerical modeling and experiment. *Ukr. J. Phys.* 64(5) (2019) 392.
37. R.S. Cohen, L. Spitzer, Jr., P.McR. Routly. The electrical conductivity of an ionized gas. *Phys. Rev.* 80(2) (1950) 230.
38. L. Spitzer Jr.; R. Härm. Transport phenomena in a completely ionized gas. *Phys. Rev.* 89(5) (1953) 977.
39. V. Zhovtyansky et al. Electric arc I-V modeling and related plasma spectrometry issues. *AIP Advances* 12 (2022) 115115.

V. V. Hladkovskiy<sup>1</sup>, V. G. Panchenko<sup>2</sup>, P. V. Porytskyi<sup>2</sup>,  
O. A. Fedorovich<sup>2</sup>, L. M. Voitenko<sup>2</sup>, L. M. Sviata<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> *National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: lsvjat@kinr.kiev.ua

#### ON THE INFLUENCE OF METAL IMPURITIES ON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE DENSE PLASMA OF PULSE ELECTRIC DISCHARGES IN WATER

The effect of metal impurities on the electrical conductivity of a dense plasma of discharges in water is considered. Conductivity calculations were based on the method of Grad's moments. It is shown that a small amount of metal impurities can significantly change the value of the electrical conductivity coefficient compared to the case of pure water vapor. It was found that metal impurities can cause both an increase and a decrease in the electrical conductivity of the plasma, which is associated with the processes of interparticle collisions and the presence of clusters.

*Keywords:* dense plasma, pulsed discharge, discharge in water, electrical conductivity of plasma, collision cross-section, cluster.

Надійшла / Received 29.07.2024