

ОПТИЧНІ ТА РЕКОМБІНАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЩІЛЬНОЇ ПЛАЗМИ

О.А. Федорович

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Використання щільної плазми (ЩП) можливе в якості робочих тіл багатьох перспективних розробок: потужні МГД – генератори, енергоустановки і ракетні двигуни з газофазними ядерними реакторами, пристрої керованого термоядерного синтезу з інерційним утриманням гарячої плазми, плазмохімічні реактори і плазмотрони, розрядно-імпульсні технологічні пристрої та багато інших установок. Щільна плазма існує також в щільних атмосферах планет, виникає при відключенні потужних високовольтних установок та високовольтних ліній електропередач і інших процесах.

Робота присвячена фізичним властивостям ЩП стиснутої настільки сильно, що в ній важливі ефекти між частковою взаємодією, а електричні мікрополя зрівнянні з електричними полями в середині атомів. При таких умовах неможливе використання традиційних уявлень та формул, розроблених для традиційної фізики плазми з концентрацією електронів, яка перевищує 10^{16} см⁻³. Починаючи з 1972 року в нашому інституті проводились дослідження щільної плазми імпульсних розрядів у воді (ІРВ) для підвищення коефіцієнта корисної дії електророзрядних гідроімпульсних установок, які знайшли широке застосування в різних галузях промисловості. Але при дослідженнях балансу енергії виявилось, що збільшення швидкості вкладу енергії в плазмовий канал не приводить до значного збільшення її перетворення в механічну енергію. Як виявилось із збільшенням як швидкості вкладу енергії так і з збільшенням її величини в плазмовий канал суттєво збільшується як його температура так і електропровідність, що з однієї сторони зменшує швидкість вкладу енергії в плазму, а з іншої суттєво збільшує втрати на оптичне випромінювання. А це приводить до різкого зменшення ККД розрядно-імпульсних установок. В деяких випадках втрати на оптичне випромінювання досягали 60 %, причому вони збільшувались з збільшенням швидкості та величини вкладу енергії в плазмовий канал. Для стабілізації форми і розмірів розряду а також повторюваності параметрів плазми у воді проводилась стабілізація розряду з допомогою вибухів провідників з різних матеріалів та різних діаметрів. Це приводило до достатньо стабільної повторюваності розрядів, але враховуючи різні температури нагріву провідників при їх вибухах і різного хімічного складу плазми було одержано багато неординарних результатів, які не описувались існуючими на той час формулами. Вихід для підвищення ККД електроімпульсних установок був запропонований в турбулізації плазмового каналу. Але більш кардинальний вихід був в використанні сумішей вибухових речовин, які при горінні виділяють велику кількість енергії, а ініціювати «вибухи» можна було з допомогою електричного розряду. Крім цього появились нові проекти, де в якості робочих тіл була запропонована щільна плазма, властивості якої були досліджені недостатньо. Це енергоустановки і ракетні двигуни з газофазними ядерними реакторами, порівняно легко керовані газофазні ядерні реактори для вироблення електроенергії, потужні МГД- генератори та інші пристрої.

Не дивлячись на широке поширення щільної плазми в космосі і всесвіті в лабораторних умовах одержувати її, а тим більше проводити діагностику достатньо важко. Це потребує одержання великих імпульсних струмів при електричних розрядах, які складають десятки і сотні тисяч ампер, і досягнення таких величин струмів за одиниці мільйонних долей секунди при падіннях напруги на плазмовому каналі довжиною 5 -100 мм до 40 кВ . Необхідно створити такі умови як на плазмовому каналі так і розробити обладнання для вимірювання електричних величин і їх реєстрацією, а також їх прив'язку по часу з початком розширення плазмового каналу. При цьому було необхідно одночасно розробити методики реєстрації спектрів випромінювання, розгорнуті в часі і прокалібровані по інтенсивності випромінювання та по довжинах хвиль. Промислового обладнання, на якому можна було проводити такі вимірювання в той час не випускалось, тому його доводилось розробляти, калібрувати, а результати фіксувати самостійно. Для фіксації спектрів використовувались модернізовані надшвидкісні фотокамери ВФУ-1(але без калібрування фотоматеріалів по інтенсивності), а в якості матеріалів для фіксації розгорток спектрів використовувались високочутливі аерофотоплівки. Інші методики не були придатні для вимірювань, не зважаючи на всі можливі і доступні екранування як експериментальної установки так і вимірювальних приладів. Одержані і правильно оброблені в 1985 році спектри випромінювання щільної плазми придатні при відповідному зберіганні і в наш час і значно пізніше, що і було зроблено при можливості обробки архівних матеріалів.

В останні роки продовжувались дослідження процесів розпаду ЩП ІРВ з домішками атомів деяких металів і розроблялись методики вимірювання концентрації такої плазми необхідні для

досліджень оснований на вивченні спектрів випромінювання (поглинання) ліній в ЩП. В роботах [1-4] опубліковані розроблені нами методики визначення концентрацій електронів по оптичних спектрах для концентрацій електронів $10^{17} \text{ см}^{-3} - 10^{22} \text{ см}^{-3}$ і визначений хід концентрацій електронів в розрядах з добавками домішок металів таких як вольфрам і мідь, а також одержані коефіцієнти розпаду воднево-кисневої ЩП в залежності від концентрації електронів в діапазоні $10^{17} \text{ см}^{-3} - 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Одержані експериментальні результати показують зменшення коефіцієнтів розпаду щільної плазми в порівнянні з розрахунками по класичних формулах для потрібної зштовхувальної рекомбінації (електрон – електрон – іон) [1-4] до шести порядків. Цей феномен зв'язаний з так званим ефектом «нереалізації оптичних рівнів атомів» в потужних мікрополях створюваних вільними електронами в ЩП. Величини таких мікрополів розраховуються за формулою Хольцмарка і при високих концентраціях електронів вони зрівнянні з напруженостями всерединоатомних полів.

Була встановлена формула емпіричної залежності так званої «оптичної щільності» від концентрації електронів [2] в діапазоні концентрацій електронів $[10^{17} \text{ см}^{-3} - 10^{22} \text{ см}^{-3}]$:

$$\Delta E = 1,32 \cdot 10^{-5} N_e^{0,26} \text{ де } [\Delta E] \text{ eВ, } [N_e] = \text{см}^{-3}.$$

Величина «оптичної щільності» визначається як різниця між потенціалом іонізації та верхнім рівнем реалізованої лінії поглинання. За цією формулою було визначено хід концентрації електронів в розрядах в певні моменти часу по появі ліній поглинання в спектрах випромінювання щільної плазми.

Враховуючи, що експериментально залежність коефіцієнтів розпаду при подвійному логарифмічному масштабі по осях була отримана практично лінійна від концентрації електронів, підбрали емпіричну формулу для цієї залежності:

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

де K коефіцієнт розпаду щільної плазми, $[K] = \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^3$; N_e – концентрація електронів у

$$\text{плазмі}; [N_e] = \text{см}^{-3}, \quad K = \frac{\left(\frac{dN_e}{dt}\right)}{N_e^2} \quad (2).$$

Ні від температури, ні від ступеню неідеальності чіткої залежності коефіцієнтів розпаду не виявлено. Одержані результати можна використати в різних галузях промисловості, в тому числі при розрахунках зачорнюючих матеріалів для охолодження і ізоляції гарячої зони газофазних ядерних реакторів від взаємодії з стінками реакторів та іншими проблемами в розробці космічних двигунів та ракет.

Одним з самих загадкових явищ природи є феномен кульової блискавки) [5]. Про неї написано сотні наукових і науково – популярних статей. Розроблені нами методики визначення концентрації електронів у щільній плазмі дозволили не тільки визначити параметри плазми кульової блискавки від моменту її утворення до повного розпаду плазми, як і її якісний склад.

В результаті виконаної роботи підтверджується, що величини «оптичної щільності» приблизно однакові для різних атомів і залежать тільки від концентрації електронів і не залежать від температури щільної плазми.

1. О. А. Fedorovich Nucl. Phys. At. Energy. 2-24 (2008) 86.
2. Федорович О.А.// Теплофизика високих температур. 2014 т.52, №4, С. 524-534.
3. Федорович О.А., Войтенко Л.М., Гладковський В.В., Гладковська О.В. // Ядерна фізика та енергетика. № 4, 2023. С. 351-359.
4. Федорович О.А., Войтенко Л.М., // ВАНТ. Серія «Плазменная электроника и новые методы ускорения» (6), №4, 2008. С.288-293.
5. Yianyong Cen, Ping Yuan, and Simin Xue// Physical review letters. PRL 112, 035001 (2014). pp 035001-5