

УДК 621.327

Р.В. Грицак, Н.С. Ілавська, О.К. Шуаїбов

Ужгородський національний університет, вул. Підгірна, 46, Ужгород, 88000

e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua, roksolanija@ukr.net

## ВУФ-ЛАМПА ЄМНІСНОГО РОЗРЯДУ НА СУМІШАХ He-H<sub>2</sub>O і Ar-H<sub>2</sub>O

Представлено результати дослідження вихідних характеристик ємнісного розряду ВУФ-лампи на сумішах He-H<sub>2</sub>O і Ar-H<sub>2</sub>O. Проведена оптимізація яскравості смуг випромінювання ОН в залежності від тиску і складу робочих сумішей. Для розряду на суміші аргону з паром води, розраховано залежності констант швидкості електронних процесів, середньої енергії та рухливості електронів від тиску пари води.

**Ключові слова:** ємнісний розряд, плазма, ВУФ-лампа, яскравість, пари води.

### Вступ

Розряди в сумішах легкоіонізуючої добавки з буферним (інертним) газом є основою для багатьох сучасних ефективних джерел ультрафіолетового випромінювання низького тиску. Як джерела УФ-ВУФ випромінювання використовують переважно ртутні, ксенонові і натрієві лампи. Недоліком цих ламп є наявність ртуті, оскільки існує проблема з утилізацією, а точніше демеркуризацією ламп, які відпрацювали свій ресурс. Це і послугувало стимулом для розробок нових джерел спонтанного УФ-випромінювання, які б були екологічно безпечними [1-4].

В роботах [5, 6] представлені основні характеристики випромінювачів тліючого розряду на парі води, які можуть перекривати спектральний діапазон 140–250 нм. Також експериментально досліджена ультрафіолетова лампа бар'єрного розряду на молекулі ОН [7]. Але менш вивченими залишились газорозрядні джерела ВУФ-випромінювання ємнісного розряду. Перевагами імпульсно-періодичного ємнісного розряду є те, що електроди не контактують з плазмою, а імпульси випромінювання мають субмікросекундну тривалість і підвищену енергію в імпульсі.

Для того, щоб зрозуміти поведінку процесів у розряді на сумішах інертних газів з паром води, доцільним є проведення чисельного моделювання газорозрядних джерел УФ-ВУФ випро-

мінювання на основі молекул гідроксилу (ОН).

У даній роботі наведені оптичні характеристики та параметри імпульсно-періодичного ємнісного розряду для сумішей He-H<sub>2</sub>O та Ar-H<sub>2</sub>O.

### Методика експерименту

Ємнісний розряд запалювався в циліндричній трубці з високоякісного кварцу. Відстань між катодом і анодом складала 20 см. Внутрішній діаметр розрядної трубки складав 5 мм. Амплітуда імпульсів напруги на електродах становила  $\pm 25 - 40$  кВ, а частота слідування імпульсів могла змінюватися в діапазоні 50 – 1000 Гц. Тривалість імпульсів струму не перевищувала 50 нс. Система реєстрації характеристик розряду описана в роботах [2, 3].

### Оптичні характеристики

Спектри випромінювання імпульсно-періодичного ємнісного розряду в сумішах Ar-H<sub>2</sub>O і He-H<sub>2</sub>O наведені в роботах [3, 8].

Плазма на основі суміші He-H<sub>2</sub>O при  $p(\text{He})=2.6$  кПа характеризувалася смугами випромінювання у ВУФ-області з максимумами у спектральному діапазоні  $\Delta\lambda = 156 - 186$  нм. Дані смуги можуть бути ототоженні з випромінюванням молекули гідроксила ОН (C→A; B→X) [9]. Для

емнісного розряду в суміші Ar-H<sub>2</sub>O при парціальних тисках  $p(\text{Ar})=1,33$  кПа і  $p(\text{H}_2\text{O})=130$  Па спектр випромінювання був близьким до спектру на суміші He-H<sub>2</sub>O.

Залежності яскравості випромінювання характеристичних смуг гідроксилу, розміщених у ВУФ-діапазоні, (газорозрядна плазма на суміші Ar-H<sub>2</sub>O) від парціального тиску пари води (при  $p(\text{Ar})=2.66$  кПа) наведені на рис. 1.

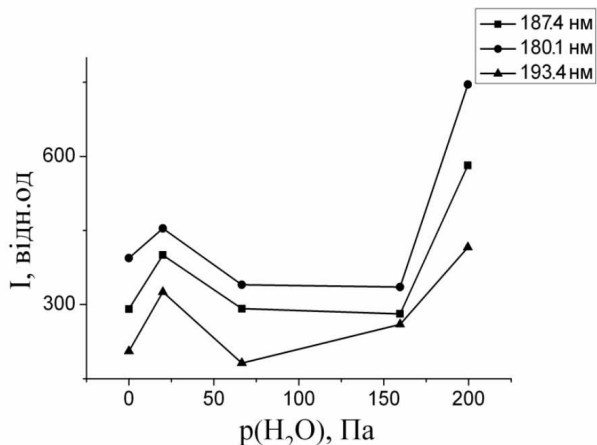


Рис. 1. Залежності яскравості випромінювання характеристичних смуг OH\* в газорозрядній плазмі на суміші Ar-H<sub>2</sub>O від парціального тиску пари води при  $p(\text{Ar}) = 2.66$  кПа.

На цих залежностях яскравості випромінювання спостерігались два максимуми: при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 10 - 30$  Па, а другий – при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 170 - 200$  Па. Це може бути зумовлено локалізацією горіння розряду в трубці [8]. На рис. 2 наведені залежності яскравості випромінювання смуг  $\lambda = 181.2; 187.4; 193.4$  нм гідроксилу для розряду в суміші Ar-H<sub>2</sub>O від парціального тиску аргону при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 130$  Па). Оптимальний тиск аргону для розряду в суміші Ar-H<sub>2</sub>O складав  $p(\text{Ar}) = 1.33$  кПа. Зі збільшенням тиску аргону яскравість випромінювання смуг OH\* у ВУФ-діапазоні зменшувалась.

Порівняння цих залежностей яскравості випромінювання емнісного розряду на суміші Ar-H<sub>2</sub>O і відповідних залежностей для розряду в суміші He-H<sub>2</sub>O, які наведені в роботі [8], показало, що яскравість випромінювання плазми на основі суміші He-H<sub>2</sub>O на порядок більша, ніж яскравість ВУФ-випромінювання плаз-

ми на основі аргонного плазмового середовища.

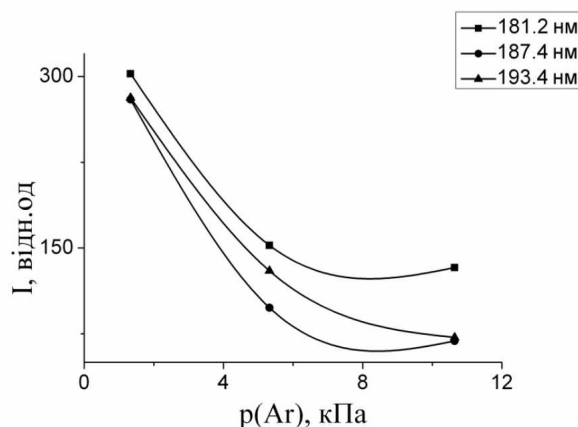


Рис. 2. Залежності яскравості випромінювання характеристичних смуг OH\* в газорозрядній плазмі на суміші Ar-H<sub>2</sub>O від парціального тиску аргону при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 130$  Па.

### Електронні кінетичні коефіцієнти

Розрахунки електронних кінетичних коефіцієнтів для розряду в суміші Ar-H<sub>2</sub>O проведені шляхом розв'язку рівняння Больцмана для функції розподілу електронів за енергією (ФРЕЕ) з використанням програми Volsig + [10].

Розрахунки параметрів розряду проводились у діапазоні  $E/N = 1-1000$  Тд при тиску суміші  $p(\text{Ar}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 1.8$  кПа–0.16 кПа, ступені іонізації –  $10^{-7}$ , щільності електронів  $10^{-11}$  см<sup>3</sup> та температурі газу – 300 К. Для чисельних розрахунків була сформована база даних ефективних перерізів взаємодії електронів з молекулами води. В базу даних програми [10] були введені ефективні перерізи електронних процесів з участю молекули води: збудження коливних рівнів та нижніх електронних станів, іонізація та дисоціативна іонізація, дисоціативне збудження та дисоціативне прилипання електронів (див. таблицю 1). Це дозволило розрахувати наступні параметри плазми на основі пари води: середня енергія електронів, рухливість електронів і константи швидкості електронних процесів. Функції розподілів електронів за енергією для розряду, які наведені на рис. 3, розраховувались для суміші  $p(\text{Ar}) - p(\text{H}_2\text{O}) = 2.6$  кПа – 10 Па при  $E/N = 250; 275; 300$  Тд. При збільшенні параметра  $E/N$

спостерігається збільшення енергії швидких електронів і зменшення щільності

електронів малих енергій.

Таблиця 1

**Електронні процеси взаємодії електронів з молекулами води, що враховувалися при розв'язанні кінетичного рівняння Больцмана для ФРЕЕ (література, з якої взяті відповідні ефективні перерізи, наведена в роботі [4])**

	Реакції
1.	Пружне розсіювання електронів $e + \text{Ar} \rightarrow e_0 + \text{Ar}$ на атомах аргону; енергія електрона $e_0$ $E(e_0) < E(e)$ .
2 - 4.	Збудження енергетичних рівнів атомів аргону: $e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}$
5.	Іонізація атома аргону: $e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}^+$
6.	Пружне розсіювання електронів $e + \text{H}_2\text{O} \rightarrow e_0 + \text{H}_2\text{O}$ ; енергія електрона $e_0$ $E(e_0) < E(e)$ .
7 - 10.	Збудження обертальних рівнів енергії молекули води (переходи: 0-1, 0-2, 0-3, 0-0).
11. 12.	Збудження коливальних мод молекули води $\text{H}_2\text{O}(000) + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(010) + e$ $\text{H}_2\text{O}(000) + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(100+001) + e$
13 - 16.	Збудження чотирьох нижніх електронних станів молекули води: $1^3\text{B}_1$ , $1^1\text{B}_1(\text{A})$ , $1^3\text{A}_1$ , $1^1\text{A}_1(\text{B})$ .
17. 18.	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{OH}(\text{X}) + e + \text{H}(n=1)$ $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{O}(1\text{S}) + e + \text{H}_2(\text{X})$ .
19 - 21.	Дисоціативне збудження молекули води по каналам: $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{OH}(\text{A}) + e + \text{H}(n=1)$ , $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{O}(3\text{P}) + e + \text{H}_2(\text{X})$ , $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{O}(5\text{P}) + e + \text{H}_2(\text{X})$ , $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{OH}(\text{X}) + e + \text{H}(n=2, 3, 4)$
22.	Іонізація молекули води: $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + 2e$ .
23 - 26.	Дисоціативна іонізація молекули води: $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{OH}^+ + \text{H} + 2e$ , $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH} + 2e$ , $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{O}^+ + \text{H}_2 + 2e$ , $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{O} + 2e$ .
27-29.	Дисоціативне прилипання по каналам: $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{OH}^- + \text{H}$ , $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{OH} + \text{H}^-$ , $\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^-$ .

Також одержано залежності середньої енергії та рухливості електронів (при  $E/N = 250$  Тд) від тиску пари води в розряді на суміші  $\text{Ar}-\text{H}_2\text{O}$  при  $p(\text{Ar}) = 2.6$  кПа. Встановлено, що зі збільшенням

парціального тиску пари води, середня енергія електронів зменшується (рис. 4). Максимальне значення середньої енергії електронів 8.2 еВ спостерігалось при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 10$  Па.

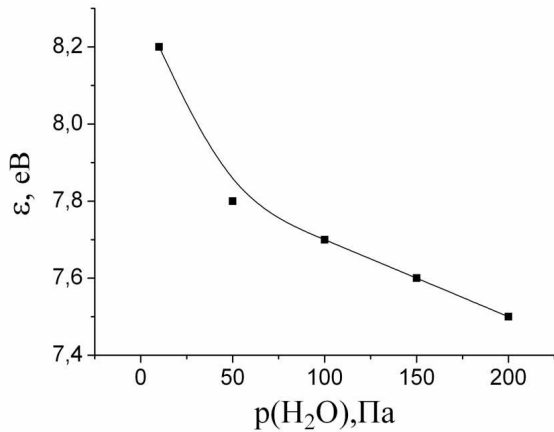


Рис. 3. Функції розподілу електронів за енергіями в розряді  $p(\text{Ar})\text{-}p(\text{H}_2\text{O}) = 2.6 \text{ кПа}\text{-}10 \text{ Па}$  при  $E/N = 250$  (1); 275 (2); 300 (3) Тд.

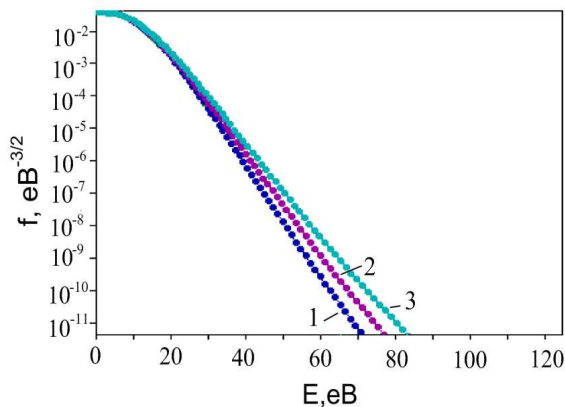


Рис. 4. Залежність середньої енергії електронів від тиску пари води в розряді на суміші  $\text{Ar}\text{-}\text{H}_2\text{O}$  при  $p(\text{Ar})=2.6 \text{ кПа}$ .

Із залежності рухливості електронів від тиску пари води (рис. 5) впливає, що з ростом тиску пари води ( $p(\text{H}_2\text{O}) = 30 - 110 \text{ Па}$ ) зростає і рухливість електронів ( $\mu_e = 7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-1} \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ). Після досягнення  $p(\text{H}_2\text{O}) = 100 \text{ Па}$  рухливість електронів зменшується.

На рис. 6 (а,б) наведені залежності констант швидкості процесів взаємодії електронів з молекулами води (при  $E/N = 250 \text{ Тд}$ ) від тиску пари води.

Із залежностей впливає, що найбільшими ( $k \sim 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ ) були константи швидкості процесу збудження обертальних рівнів молекули води, процесу пружного розсіювання електронів на молекулах води та атомах аргону. Майже на два порядки нижче ( $k \sim 10^{-14} - 10^{-15} \text{ м}^3/\text{с}$ ), були константи швидкості утворення гідроксилу  $\text{OH}(X)$  (рис. 6 (а)).

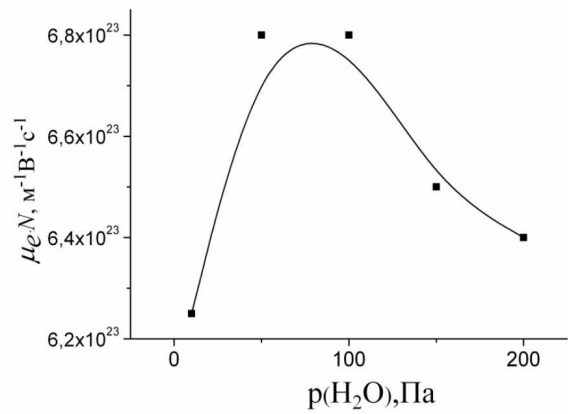


Рис. 5. Залежність рухливості електронів від тиску пари води в розряді на суміші  $\text{Ar}\text{-}\text{H}_2\text{O}$  при  $p(\text{Ar})=2.6 \text{ кПа}$ .

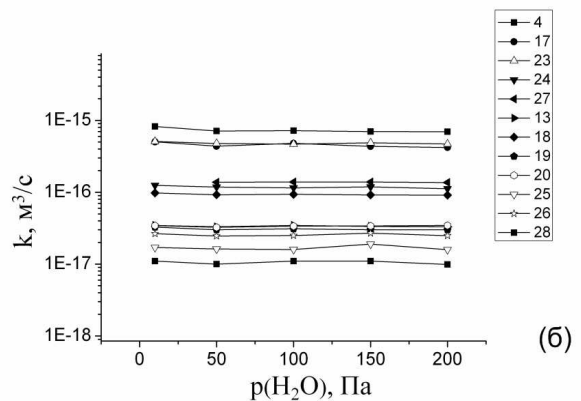
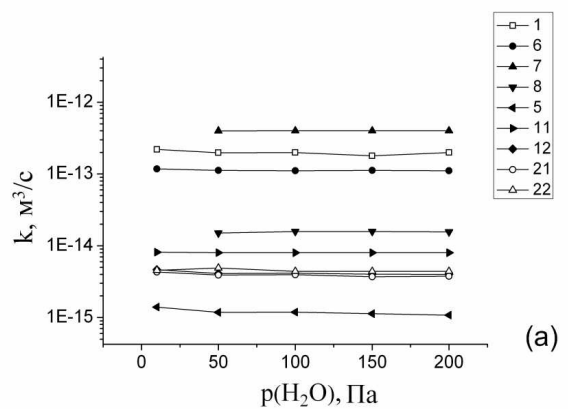


Рис. 6. Залежності констант швидкості електронних процесів в розряді на суміші  $\text{Ar}\text{-}\text{H}_2\text{O}$  (а,б).

Константа швидкостей процесу дисоціативного прилипання електронів ( $k \sim 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$ ) була на порядок більша від константи процесів дисоціативної іонізації та від константи швидкості утворення гідроксилу  $\text{OH}(A)$  ( $k \sim 10^{-17} \text{ м}^3/\text{с}$ ), розпад якого і призводить до випромінювання смуги 306-308 нм. Найменшими з залежностей від тиску пари води були константи збудження нижніх електронних ста-

нів молекули води ( $k \sim 10^{-18} - 10^{-19} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (рис. 6 (б)).

Отримані електронні кінетичні коефіцієнти, шляхом чисельного моделювання, можуть бути використані при розрахунках кінетики процесів у плазмі на основі суміші Ar-H<sub>2</sub>O.

### Висновки

Отже, у даній роботі досліджені характеристики плазми на суміші Ar-H<sub>2</sub>O і He-H<sub>2</sub>O. Основними у спектрах ВУФ випромінювання на суміші He-H<sub>2</sub>O є смуги  $\lambda = 156; 180,3; 186 \text{ нм}$ . Спектр випромінювання суміші Ar-H<sub>2</sub>O був близьким до He-H<sub>2</sub>O і відрізнявся в основному величиною інтенсивності випромінювання гідроксилу. Для випромінювання на суміші аргону з парами H<sub>2</sub>O спостерігаються два максимуми – при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 10 - 30 \text{ Па}$  та при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 170 - 200 \text{ Па}$ . Оптимальний тиск аргону складає 1.33 кПа.

За допомогою програми Bolsig + [10] були отримані параметри плазми при чисельному моделюванні, які можуть бути використані при розрахунках кінетики процесів ВУФ-лампи.

Дослідження залежностей середньої енергії та рухливості електронів (при  $E/N = 250 \text{ Тд}$ ) від тиску пари води в розряді на суміші Ar-H<sub>2</sub>O при  $p(\text{Ar}) = 2.6 \text{ кПа}$  показало, що максимальне значення середньої енергії електронів  $\varepsilon = 8.2 \text{ еВ}$  спостерігається при  $p(\text{H}_2\text{O}) = 10 \text{ Па}$ . Оптимальний тиск пари води, коли рухливість електронів становить  $\mu_e = 7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-1} \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ , складає  $p(\text{H}_2\text{O}) = 30 - 110 \text{ Па}$ . Найбільшими були константи швидкості процесу збудження обертальних рівнів молекули води, процесу пружного розсіювання електронів на молекулах води та атомах аргону ( $k \sim 10^{-13} \text{ м}^3/\text{с}$ ). Найменшими з залежностей від тиску пари води були константи збудження нижніх електронних станів молекули води ( $k \sim 10^{-18} - 10^{-19} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вуль А.Я., Кидалов С.В., Миленин В.М., Тимофеев Н.М., Ходорковський М.А. Новый эффективный газоразрядный источник оптического излучения низкого давления на основе гидроксила OH // Письма в ЖТФ . – 1999. – Т. 25. – № 1. – С. 10 – 16.
2. Шуайбов А.К., Генерал А.А., Шпеник Ю.О., Жменяк Ю.В., Шевера И.В., Грицак Р.В. Ультрафиолетовые источники излучения на парах воды (H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O) // ЖТФ. – 2009. – Т.79. – № 8. – С. 153 – 155.
3. Миня О.Й., Шуайбов О.К., Шевера И.В., Грицак Р.В., Гомоки З.Т. Коротковолновый випромінювач ємнісного розряду на парі води // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2010. – № 28. – С. 135 – 139.
4. Шуайбов О.К., Малінін О.М. Випромінювальні характеристики та електронні кінетичні коефіцієнти плазми на основі пари води // Науковий вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2010. – № 27. – С. 50 – 59.
5. Шуайбов А.К., Шимон Л.Л., Дашенко А.И., Шевера И.В. Электроразрядный ВУФ-излучатель на парах воды // Письма в ЖТФ . – 2001. – Т. 27. – № 15. – С. 46 – 50.
6. Шуайбов А.К., Дашенко А.И., Шевера И.В. Стационарный излучатель в диапазоне 130 — 190 нм на основе плазмы паров воды // Квантовая электроника. – 001. – Т.31. - №6. – С. 547 – 548.
7. Соснин Э.А., Ерофеев М.В., Авдеев С.М, Панченко А.Н., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Ультрафиолетовая лампа барьерного разряда на молекулах OH // Квантовая Электроника. – 2006. – Т.36. – № 10. – С. 981 – 983.
8. Шуайбов А.К., Миня А.Й., Гомоки З.Т., Шевера И.В., Грицак Р.В. Вакуумно-ультрафиолетовый излучатель низкого давления на смеси гелия

с парами воды // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 3. – С. 64 – 67.

London: Chapman Hall LTD, 1963. – P. 347.

9. Pears R.W.B., Gaydon A.G. The identification of molecular spectra. –

10. <http://siglo-kinema.com/bolsig.htm>

Стаття надійшла до редакції 28.05.2011

R.V. Hrytsak, N.S. Plavska, A.K. Shuaibov

Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Pidgirna Str., 46

## VUV-LAMP OF THE CAPACITIVE DISCHARGE ON THE MIXTURES He-H<sub>2</sub>O AND Ar-H<sub>2</sub>O

The results of studies of the output characteristics of the capacitive discharge VUV - lamps on the mixtures He-H<sub>2</sub>O and Ar-H<sub>2</sub>O are presented. The optimization of the hydroxyl emission bands OH intensity, depending on the pressure of the mixture is conducted. The dependences of the rate constants of the processes, mean energy and electron mobility on the water vapor pressure for discharge on a mixture of Ar-H<sub>2</sub>O are calculated.

**Key words:** capacitive discharge, plasma, VUV-lamp, intensity, water vapour.

Р.В. Грицак, Н.С. Илавская, А.К. Шуайбов

Ужгородский национальный университет, Ужгород, 88000, ул. Пидгирна, 46

## ВУФ-ЛАМПА ЁМКОСТНОГО РАЗРЯДА НА СМЕСЯХ He-H<sub>2</sub>O и Ar-H<sub>2</sub>O

Представлены результаты исследования выходных характеристик ёмкостного разряда ВУФ-лампы на смесях He-H<sub>2</sub>O и Ar-H<sub>2</sub>O. Проведена оптимизация яркости полос излучения OH в зависимости от давления и состава рабочих смесей. Для разряда на смеси аргона с парой воды рассчитаны зависимости констант скорости электронных процессов, средней энергии и подвижности электронов от давления паров воды.

**Ключевые слова:** ёмкостной разряд, плазма, ВУФ-лампа, яркость, водяной пар.