

УДК 537.52:533.9.07:538.911

Веклич А.М., д.ф.-м.н., проф.,
Клещич М.М., асп.,
Борецький В.Ф., к.ф.-м.н., доц.,
Фесенко С.О., асист.,
Телега В.М., к.ф.-м.н., зав. лаб. НДІ ФЕ

Спектроскопія плазми електричної дуги між Cu-Ni електродами в потоці аргону

Київський національний університет імені
Тараса Шевченка, 03022, просп. Глушкова 4Г,
Київ, Україна
e-mail: van@univ.kiev.ua

Veklich A.N., D.Sci., Professor,
Kleshich M.M., Ph.D. stud.,
Boretskij V.F., Ph.D., Associate Professor,
Fesenko S.O., Assistant Professor,
Telega V.N., Ph.D., head of R&D Phys. El. Lab.

Plasma spectroscopy of electric arc between Cu-Ni electrodes in argon flow

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
03022, Glushkova Av., 4G, Kyiv, Ukraine
e-mail: van@univ.kiev.ua

Досліджено плазму електродугового розряду між Cu – Ni електродами в потоці аргону за допомогою оптичної емісійної спектроскопії у припущенні локальної термодинамічної рівноваги. Методом відносних інтенсивностей одержані радіальні профілі температури у стовпі плазми. Для визначення радіального розподілу температури використані спектральні лінії міді та нікелю. Рекомендовані спектральні лінії Ni I для діагностики плазми.

Ключові слова: плазма електродугового розряду, оптична емісійна спектроскопія, метод відносних інтенсивностей.

Plasma of electric arc discharge between Cu–Ni electrodes in argon flow at arc current 3.5 A in the assumption of local thermodynamic equilibrium was investigated by optical emission spectroscopy. The qualitative difference between emission spectrum of the investigated plasma source in comparison with the free-burning electric arc in air was found. Namely, its spectrum contains a much larger number of nickel atomic spectral lines. Selection of Ni I spectral lines for purposes of plasma diagnostics was carried out. The radial profiles of temperature in discharge column were obtained by method of relative intensities of spectral lines. Copper and nickel atomic spectral lines were used with this aim. The total intensity of three spectral lines Ni I 508.0, 508.1, 508.4 nm in combination with line Ni I 547.6 nm is proposed to determine the temperature by method the relative intensities in diagnostics of plasma with nickel vapour impurities.

Key words: plasma of electric arc discharge, optical emission spectroscopy, method of relative intensities.

Статтю представив д.ф.-м.н., проф. Анісімов І.О.

Вступ

На сьогодні при виготовленні електродів або контактів приладів, які використовуються в електротехнічній галузі для комутації електричного струму, часто використовуються композитні матеріали [1]. Перевагою таких матеріалів є поєднання високої ерозійної стійкості та задовільної теплопровідності і електропровідності. Зокрема, прийнятні ерозійні властивості композитів забезпечуються завдяки тугоплавкій компоненті в цій композиції (наприклад, вольфраму, молібдену або оксидів металів). Наявність легкоплавкої компоненти у складі композита (наприклад, міді або срібла)

забезпечує необхідну електропровідність та теплопровідність. Такі композитні матеріали, як правило, виготовляються методами порошкової металургії [2, 3].

Очевидно, розробка композитних матеріалів не може бути покращена без досконалого вивчення впливу електричної дуги на робочий шар поверхні електродів. Отже, доцільно дослідити вплив параметрів плазми дугового розряду на ерозійні властивості таких композитів. Тому, першочерговим завданням такого типу досліджень є розробка засобів контролю параметрів плазми таких розрядів [4]. Раніше для діагностики електричної дуги, яка

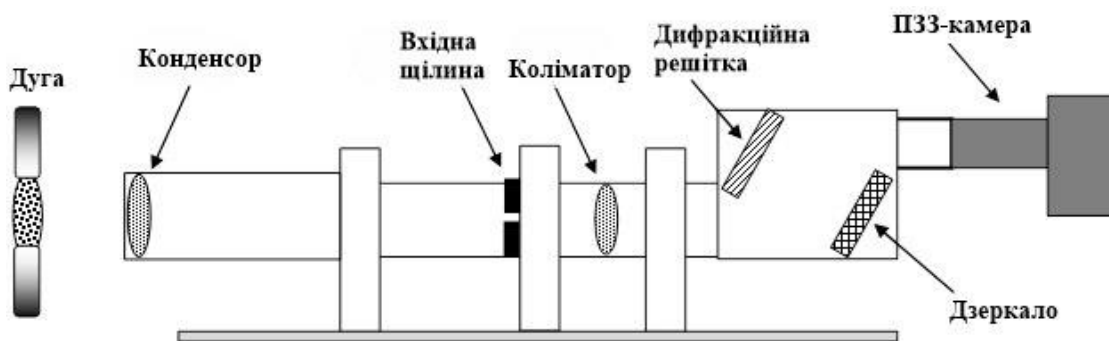


Рис. 1 Оптична схема експериментальної установки [8].

горить у повітрі [5-7] або в потоці аргону [8] між композитними електродами на основі міді або срібла, розроблені методи оптичної емісійної спектроскопії плазми та лазерної абсорбційної спектроскопії. У припущенні локальної термодинамічної рівноваги (ЛТР) в плазмі досліджено дуговий розряд силою струму 3.5 або 30 А між плоскими торцевими поверхнями неохолоджуваних стрижневих електродів. Такі дуги можуть бути використані як модельне джерело реальних дугових розрядів у комутуючих приладах електротехнічної промисловості.

Мета цієї роботи – розробка методики оптичної емісійної спектроскопії плазми електричної дуги з домішками парів нікелю. А саме, в рамках цього дослідження, виконується:

- порівняння спектрів випромінювання плазми вільно існуючого розряду між Cu–Ni електродами у повітрі та в потоці аргону;
- селекція спектральних ліній та спектроскопічних констант атому нікелю для використання їх в оптичній емісійній спектроскопії при визначенні температури плазми.

Отже, застосування перевіреної в цій роботі спектроскопічної методики дозволить дослідити на наступних етапах проблему взаємодії плазми дуги і поверхні композитних Cu–Ni електродів.

Експериментальна установка

Електрична дуга запалювалась у потоці аргону (6.4 стандартних літрів на хвилину) між торцевими поверхнями неохолоджуваних електродів. Розрядний проміжок складав 8 мм, діаметр електродів – 6 мм, струм дуги – 3.5 А. Електроди розташовані вертикально: верхній електрод – Ni (катод), нижній електрод – Cu

(анод). Такого типу розряд можна розглядати як спрощену початкову модель електричної дуги між композитними електродами Cu–Ni. Потік газу (аргону) у цьому джерелі спрямовувався з боку верхнього електроду співвісно до розряду.

З метою порівняння одержаних результатів виконували дослідження вільно існуючої у повітрі електричної дуги у такому ж режимі роботи розряду.

Для одночасної реєстрації спектральних та просторових розподілів інтенсивності випромінювання електричної дуги застосували розроблену раніше методику діагностики [8]. У цьому випадку використали дифракційний спектрометр та цифрову камеру на основі приладу із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) (рис. 1).

Для обробки отриманих зображень спектрів випромінювання плазми використано графічний інтерфейс користувача [8].

Реєстрацію просторових розподілів інтенсивності випромінювання електродугового розряду виконували у спектральному діапазоні 400 – 660 нм.

Через бічне спостереження неоднорідного плазмового об'єкта (як було реалізовано в даній експериментальній установці) для одержання локальних значень інтенсивності необхідно застосовувати перетворення Абеля. В графічному інтерфейсі користувача ця процедура виконується відповідно до алгоритму, запропонованому в роботі [9], у припущенні осової симетрії джерела оптичного випромінювання [8].

В процесі реєстрації спектрів випромінювання електродугової плазми врахована нерівномірність спектральної чутливості ПЗЗ матриці. Максимальна чутливість використаної в експериментальних дослідженнях

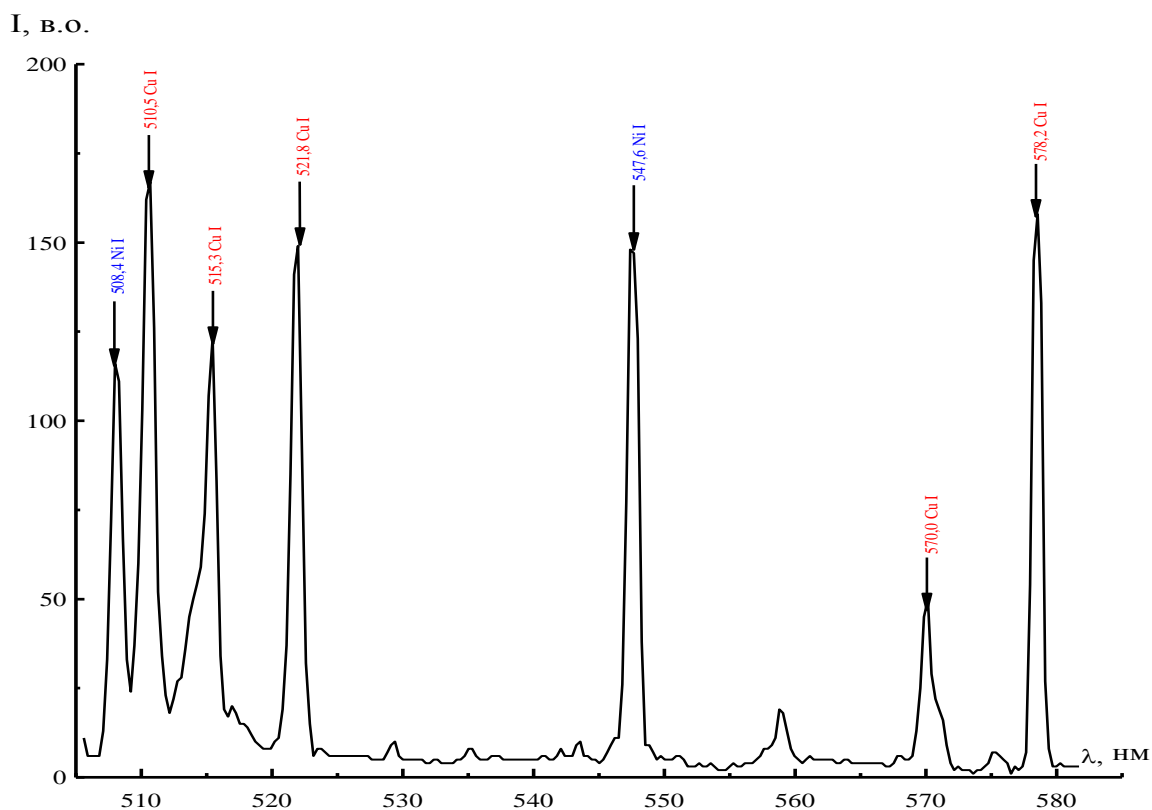


Рис. 2. Спектр випромінювання електродугового розряду між Cu-Ni електродами в повітрі.

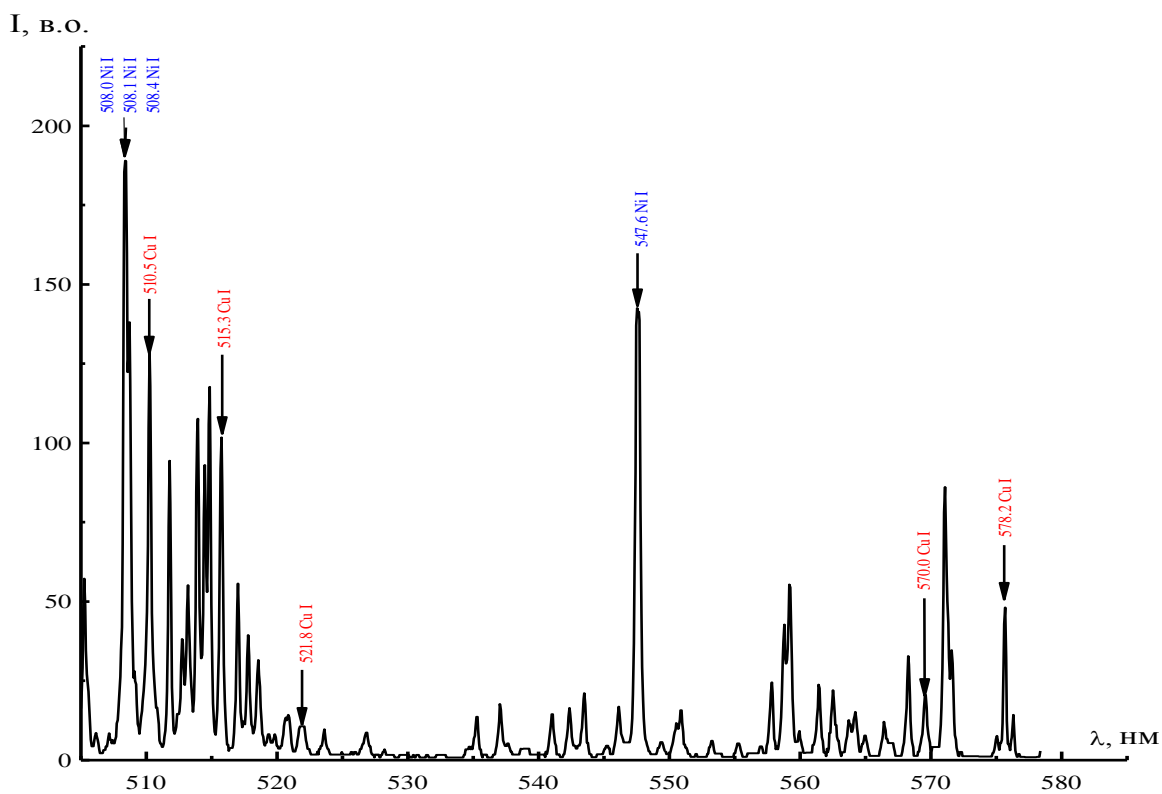


Рис. 3. Спектр випромінювання електродугового розряду між Cu-Ni електродами в потоці аргону.

Таблиця 1

Спектроскопічні дані Cu I та Ni I.

Елемент	λ , нм	Перехід $i \rightarrow j$	g_j	g_i	E_j , eB	E_i , eB	$g_j f_{ji}$ [10]	$g_j f_{ji}$ [11]	$g_j f_{ji}$ [5]
Cu I	510.5	$3d^9 4s^2 \rightarrow 3d^{10} 4p$	6	4	1.38	3.81	0.0312	0.02	0.0197
	515.3	$3d^{10} 4p \rightarrow 3d^{10} 4d$	2	4	3.78	6.19	0.96	1.9	1.6466
	521.8	$3d^{10} 4p \rightarrow 3d^{10} 4d$	4	6	3.81	6.19	1.84	2.4	1.9717
	570.0	$3d^9 4s^2 \rightarrow 3d^{10} 4p$	4	4	1.64	3.81	0.0048	0.0069	0.0057
	578.2	$3d^9 4s^2 \rightarrow 3d^{10} 4p$	4	2	1.64	3.78	0.01656	0.027	0.0130
Ni I	508.0	$3d^9 ({}^2D)4p \rightarrow 3d^9 ({}^2D_{5/2})4d$	11	9	3.65	6.09	1.35	8.0	
	508.1	$3d^9 (2D)4p \rightarrow 3d^9 ({}^2D_{3/2})4d$	9	7	3.84	6.28	1.96	6.7	
	508.4	$3d^9 ({}^2D)4p \rightarrow 3d^9 ({}^2D_{5/2})4d$	7	9	3.67	6.11	1.05	2.1	
	547.6	$3d^{10} \rightarrow 3d^9 ({}^2D)4p$	1	3	1.82	4.08	0.13	0.21	

матриці перебуває в діапазоні довжин хвиль 500 – 600 нм. Для корекції нерівномірності її спектральної чутливості (в досліджуваному діапазоні 400 – 600 нм) використали еталонну вольфрамову лампу.

Додатковою проблемою у процесі реєстрації спектрів є недостатній динамічний діапазон цього типу матриці. З метою оптимального вимірювання інтенсивності спектральних ліній в кожному експерименті підбирали відповідний час експозиції. З цією ж метою, в разі потреби, використовували нейтральні світлофільтри.

Результати та обговорення

На першому етапі виконували спектроскопічні дослідження плазми вільно існуючого електродугового розряду у повітрі. На рис. 2 показано спектр випромінювання плазми, в якому чітко спостерігаються спектральні лінії як атома міді, так і атома нікелю. На цьому етапі також виконали попередню селекцію спектральних ліній та спектроскопічних констант атома нікелю.

На наступному етапі досліджень зареєстровано спектр плазми електродугового розряду в потоці аргону (рис. 3). Порівняння спектрів, представлених на рис. 2 та 3, дозволяє зробити висновок, що спектр випромінювання плазми електродугового розряду у потоці аргону

містить значно більшу кількість спектральних ліній атома нікелю. Цей ефект потребує подальшого, більш детального, дослідження.

Для визначення температури плазми (у припущенні ЛТР) використали метод відносних інтенсивностей із залученням спектральних ліній Ni I 508.4 та 547.6 нм.

Проте, дослідженнями встановлено, що поруч зі спектральною лінією 508.4 нм розташовані ще лінії Ni I 508.0 та 508.1 нм. Тобто, фактично зареєстрований просторовий розподіл інтенсивності випромінювання в околі 508 нм складається із трьох спектральних компонент. Зазначимо, що енергії збудження верхніх рівнів спектральних переходів досліджуваних ліній (508.0, 508.1, 508.4 нм) складають, відповідно, 6.09, 6.28, 6.11 eB. Крім того, внесок випромінювання кожної спектральної лінії в результуючий просторовий розподіл інтенсивності є співвимірним. Тому, при визначенні радіального розподілу температури запропоновано використати сумарну інтенсивність цих ліній.

У розрахунках профілю температури використали середню енергію збудження зазначених трьох спектральних ліній, а добуток $g_j \cdot f_{ji}$ необхідно взяти як суму трьох доданків (табл. 1):

$$(g_j \cdot f_{ji})_{508.0} + (g_j \cdot f_{ji})_{508.1} + (g_j \cdot f_{ji})_{508.4} \quad (1)$$

Крім того, з метою перевірки доцільності використання такого підходу, при визначенні радіального розподілу температури плазми методом відносних інтенсивностей додатково залучили такі спектральні лінії атома міді – Cu I 510.5 та 515.3 нм (табл. 1). В досліджуваному режимі роботи дуги спектральні лінії Cu I 521.8, 570.0, 578.2 нм використати практично неможливо через їх слабку інтенсивність випромінювання.

На рис. 4 показано, одержаний із залученням спектральних ліній Ni I та Cu I, радіальний розподіл температури плазми в середньому поперечному перерізі електродугового розряду між Cu–Ni електродами силою струму 3.5 А в потоці аргону. В розрахунках температури використали спектроскопічні константи атома нікелю та міді із джерел [11] та [5], відповідно. Радіальні профілі температури, визначені із залученням спектральних ліній Cu I та Ni I, збігаються в межах похибки вимірювань.

Таким чином, запропонований у цьому дослідженні спосіб використання сумарної інтенсивності спектральних ліній Ni I 508.0, 508.1, 508.4 нм для визначення температури методом відносних інтенсивностей у поєднанні з лінією Ni I 547.6 нм можна рекомендувати для діагностики плазми з домішками нікелю.

Крім того, на основі аналізу одержаного розподілу температури (рис. 4), можна рекомендувати для подальшого використання у дослідженнях значень спектроскопічних констант атому нікелю саме із роботи [11] (на відміну від наведених в базі даних NIST [10]).

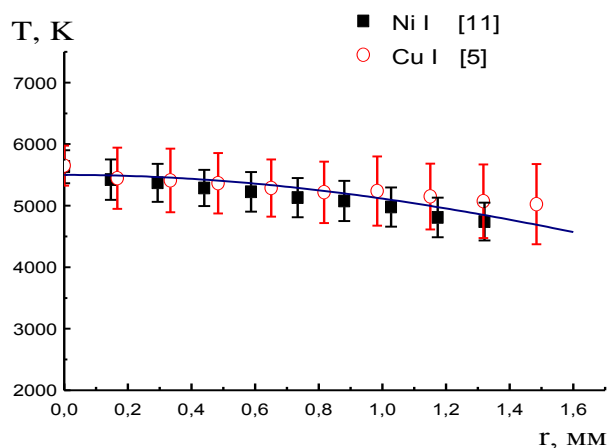


Рис. 4. Радіальний розподіл температури плазми електродугового розряду між Cu–Ni електродами силою струму 3.5 А із залученням спектральних ліній Ni I та Cu I.

Висновки

Спектроскопічними дослідженнями плазми електродугового розряду в потоці аргону між Cu–Ni електродами силою струму 3.5 А встановлено:

- якісну відмінність спектру випромінювання такого плазмового джерела у порівнянні із вільно існуючим розрядом у повітрі, а саме: його спектр містить значно більшу кількість спектральних ліній атома нікелю;

- можливість використання для діагностики плазми з домішками нікелю сумарної інтенсивності трьох спектральних ліній Ni I 508.0, 508.1, 508.4 нм для визначення температури методом відносних інтенсивностей у поєднанні з лінією Ni I 547.6 нм.

Список використаних джерел

1. Буткевич Г.В. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Буткевич Г.В., Белкин Г.С. – Москва: Энергия, 1978, – 253 с.
2. Минакова Р.В. Тенденции развития технологий изготовления композиционных материалов и контактов из них // Минакова Р.В., Кресанова А.П., Чураков М.М., Хоменко Е.В. // Электрические контакты и электроды. – Киев: Ин-т пробл. Материаловедения НАН Украины. – 1998. – С. 5-19.
3. Minakova R.V. Contact interaction, W (Mo, Cr)-Cu structure and properties of composites with additives// Minakova R.V., Lesnik N.D., Kresanova A.P., Flis A.A., Khomenko E.V. //

References

1. BUTKEVICH G.V. (1978) *Electrical erosion of high-current contacts and electrodes*. Moscow: Energiya.
2. MINAKOVA R.V. KRESANOVA A.P., CHURAKOV M.M., KHOMENKO E.V. (1998) The development tendencies of manufacturing technologies of composite materials and their contacts. *Electric Contacts and Electrodes*. Kiev, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science. p. 5-19.
3. MINAKOVA R.V., LESNIK N.D., KRESANOVA A.P., FLIS A.A., KHOMENKO E.V. (1996) Contact interaction, W (Mo, Cr)-Cu structure and properties of composites with additives. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*

- Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – Kiev: Frantsevich Institute for Problems of Materials Science. – 1996. – **35**. – P.7-8.
4. Лохте-Хольтгревен В. Методы исследования плазмы. – Москва: Мир, 1971, – 552 с.
 5. Babich I.L. Spectroscopic data and Stark broadening of Cu I and Ag I spectral lines: Selection and analysis // Babich I.L., Boretskij V.F., Veklich A.N., Semenyshyn R.V. // *Advances in Space Research*. – 2014. – **54**. – P.1254-1263.
 6. Semenyshyn R.V.. Spectroscopy peculiarities of thermal plasma of electric arc discharge between electrodes with Zn admixtures // Semenyshyn R.V., Veklich A.N., Babich I.L., Boretskij V.F. // *Advances in Space Research*. – 2014. – **54**. – P.1235-1241.
 7. Fesenko S. Properties of thermal air plasma with admixing of copper and carbon // Fesenko S., Veklich A., Boretskij V., Cressault Y., Gleizes A., Teulet Ph. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – **550**. – 012008 (8pp.).
 8. Veklich A.N. Investigations of thermal plasma with metal impurities. Part II: Peculiarities of spectroscopy by W I, Mo I, Cu I spectral lines// Veklich A.N., Lebid A.V., Soroka P.V., Boretskij V.F., Babich I.L. // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. – 2013. – №1. – **19**. – P.213-215.
 9. Bockasten. K. Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma // *Journ. of Opt. Soc. of Am.* – 1961. – **51**. – №9. – P.943-947.
 10. Kramida A. NIST. Atomic Spectra Database [База даних] / Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team (2014) // Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. – accessed 27.06.2015. <http://physics.nist.gov/asd>
 11. Корлисс Ч. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов // Корлисс Ч., Бозман У. – Москва: Мир, 1968, – 552 с.
 - Kiev, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science. 35. p.7-8.
 4. LOCHTE-HOLTGREVEN W. (1971) *Plasma diagnostics*. Moscow: Mir.
 5. BABICH I.L., BORETSKIJ V.F., VEKLICH A.N., SEMENYSHYN R.V. (2014) Spectroscopic data and Stark broadening of Cu I and Ag I spectral lines: Selection and analysis *Advances in Space Research*. 54. p.1254-1263.
 6. R.V. SEMENYSHYN. VEKLICH A.N., BABICH I.L., BORETSKIJ V.F. (2014) Spectroscopy peculiarities of thermal plasma of electric arc discharge between electrodes with Zn admixtures. *Advances in Space Research*. 54. p.1235-1241.
 7. FESENKO S., VEKLICH A., BORETSKIJ V., CRESSAULT Y., GLEIZES A., TEULET PH. (2014) Properties of thermal air plasma with admixing of copper and carbon. *Journal of Physics: Conference Series*. 550. 012008 (8pp.)
 8. VEKLICH A.N., LEBID A.V., SOROKA P.V., BORETSKIJ V.F., BABICH I.L. (2013) Investigations of thermal plasma with metal impurities. Part II: Peculiarities of spectroscopy by W I, Mo I, Cu I spectral lines. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Plasma Physics*. 19(1). p.213-215.
 9. K. BOCKASTEN. (1961) Transformation of observed radiances into radial distribution of the emission of a plasma. *Journ. of Opt. Soc. of Am.* 51(9). p.943-947.
 10. KRAMIDA A., RALCHENKO YU., READER J. AND NIST ASD TEAM NIST. (2014) *Atomic Spectra Database* [Online]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology. – accessed 28.06.2015. <http://physics.nist.gov/asd>
 11. CORLISS C.H., BOZMAN W.R. (1968) *The transition probabilities and oscillator strengths of 70 elements*. Moscow: Mir.

Надійшла до редколегії 30.06.15