

Властивості плазми електродугового розряду в повітрі з домішками міді та вуглецю

А. М. Веклич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький, Я. Крессо*,
А. Глесс*, Ф. Тельє*

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна,
e-mail: van@univ.kiev.ua

*Університет ім. Поля Сабатьє, Тулуза III, Франція

Методами оптичної емісійної спектроскопії досліджено параметри термічної плазми електродугового розряду в повітрі між мідними та композитними Си—С електродами. Запропоновано комплексний підхід для визначення радіальних розподілів електронної концентрації в плазмі, який поєднує експериментальний та розрахунковий методи. Для розрахунку радіальних розподілів електронної концентрації розв'язано рівняння енергетичного балансу. У припущенні локальної термодинамічної рівноваги в плазмі з одержаного профілю електропровідності отримано радіальний розподіл електронної концентрації. Задовільний збіг одержаних різними методами результатів свідчить, що апробована методика діагностики може бути використана для дослідження термічної плазми електродугового розряду з домішками міді та вуглецю.

Ключові слова: термічна плазма, електродуговий розряд, температура, електронна концентрація, електропровідність, рівняння енергетичного балансу.

Вступ

В колах живлення електрорухомого транспорту часто використовуються мідний дріт та різні типи контактних вставок, які закріплені на поверхні пантографа. Як матеріал для виготовлення таких вставок широко застосовують графіт, кокс, мідно-графітові композити або мідні сплави. Кожен із згаданих матеріалів має свої переваги та недоліки [1]. Гарні змашувальні властивості коксових та графітових вставок нівелюються їхнім порівняно високим електричним опором. Через значне виділення джоулевого тепла внаслідок відпалу суттєво погіршуються трибологічні параметри мідного дроту [2]. Окрім того, такі вставки мають досить малу твердість, а отже, малий ресурс експлуатації.

Металеві контактні вставки на основі мідних сплавів мають значно менший електричний опір та більший ресурс. Однак внаслідок спорідненості металу вставки із міддю утворюються численні задирки на дроті, що призводить до його значного зношування. Зазначимо, що ціна мідного дроту суттєво вища за ціну вставок.

Тому компромісним інженерним рішенням є застосування мідно-графітових контактних вставок [1]. Вони за рахунок наявного в їхньому складі графіту мають також гарні змашувальні властивості. Мідь забезпечує кращу у порівнянні з графітовими вставками електропровідність. Для уникнення спорідненості композитних вставок із мідним дротом вміст міді в них має бути незначним (наприклад, вміст міді в досліджуваних у цій роботі композитах становить 20% [3]).

© А. М. Веклич, С. О. Фесенко, В. Ф. Борецький, Я. Крессо, А. Глесс,
Ф. Тельє, 2014

Крім того, між провідником та контактом пантографа часто виникає електрична дуга, що призводить до значної ерозії матеріалу. Це явище суттєво посилюється при обмерзанні провідника. Розуміння процесів масоперенесення в розрядному проміжку або, принаймні, дослідження властивостей плазми таких розрядів допоможе виявити найкритичніший параметр, який визначає електроерозійну стійкість запропонованих матеріалів. Оптимізація складу композитів для виготовлення вставок дозволить поліпшити економічні показники їхнього виробництва і додатково забезпечить економію контактного дроту.

Метою цієї роботи є дослідження параметрів плазми модельної електричної дуги, яка горить в повітрі між Cu—C композитними або мідними електродами із залученням комплексних (як експериментальних, так і теоретичних) методів.

Експериментальні дослідження Методика експерименту

Вільно існуючу електричну дугу запалювали у повітрі між поверхнями композитних Cu—C електродів без примусового охолодження. Додатково з метою порівняння досліджували дуговий розряд між мідними електродами у потоці повітря зі швидкістю 6,44 л/хв. Діаметр електродів — 6 мм, міжелектродний проміжок складав 8 мм. З метою уникнення інтенсивного розплавлення електродів застосували імпульсний режим живлення дуги: імпульс струму 30 А тривалістю 30 мс накладали на розряд струму 3,5 А, що дозволило запобігти швидкому згоранню електродів. Для запалювання розряду використовували модельне кероване джерело, яке імітує процес розмикання контакту між провідником та контактом пантографа.

Вимірювання температури

Для визначення температури використали відомий в оптичній емісійній спектроскопії плазми метод діаграм Больцмана. Для вимірювання інтенсивності спектральних ліній застосували два підходи. У першому одночасно записувався просторовий розподіл інтенсивності лише однієї спектральної лінії [4]. Спектральним приладом у цій конфігурації оптичної схеми слугував монохроматор МДР-12. Зображення на його вихідній щілині реєстрували ПЗЗ лінійкою Sony ILX526A. Оскільки вільно існуюча дуга є нестационарною у часі та просторі, всі зареєстровані просторові розподіли кожної із досліджуваних спектральних ліній усереднювали за статистичним ансамблем.

Другий підхід передбачав одночасну реєстрацію просторового розподілу інтенсивності багатьох спектральних ліній за допомогою спектрометра та цифрової камери на його виході [5]. Відбір спектральних ліній Cu I та аналіз їх спектроскопічних констант попередньо виконано у роботі [6]. Для діагностики плазми відібрано такі спектральні лінії: 510,5; 515,3; 521,8; 570,0 та 578,2 нм.

Вимірювання електронної концентрації

Радіальні розподіли електронної концентрації плазми електродугового розряду силою струму 30 А отримані з півширини спектральної лінії Cu I 515,3 нм у припущенні, що домінуючим механізмом її розширення є квадратичний ефект Штарка. Для реєстрації спектрального контуру цієї

лінії в оптичну схему додавався інтерферометр Фабрі—Перо, який працював у режимі еталону [7]. Для обробки одержаних даних у вигляді інтерферограм використовували спеціальний графічний інтерфейс.

На жаль, інтерферометр Фабрі—Перо через досить широкую апаратну функцію еталона не можна було застосувати для визначення півширини спектральної лінії, яка випромінюється плазмою дуги силою струму 3,5 А. Тому електронна концентрація для цього струму обчислена у непрямої спосіб на основі отриманих раніше плазмових параметрів, а саме: електронної концентрації для струму 30 А, розподілу температури та відношення інтенсивності окремої спектральної лінії Cu I для струмів 3,5 та 30 А. Детально цей алгоритм описано в роботі [6].

Результати експериментів та їх обговорення

Радіальні розподіли температури $T(r)$ електродугового розряду в середньому перерізі розрядного проміжку показані на рис. 1. Експериментально одержані дані та похибки в межах довірчого інтервалу апроксимовані окремими функціями Гаусса T , T_{sup} і T_{inf} відповідно.

В попередніх дослідженнях вивчали властивості плазми електричної дуги між мідними електродами у потоці повітря силою струму 3,5 А. Відповідно до експериментальних результатів розраховували радіальні розподіли теплопровідності та електропровідності плазми [8]. Виявлено, що мідна домішка практично не впливає на теплопровідність плазмової суміші в діапазоні температур $3000 \text{ K} < T < 6000 \text{ K}$ (рис. 2, *a*). Добре відомо [8], що, на відміну від теплопровідності, електропровідність дуже чутлива до наявності металевої домішки в плазмі (рис. 2, *б*).

Електропровідність плазми σ можна одержати із розв'язку рівняння енергетичного балансу Еленбааса—Геллера

$$\sigma E^2 + \frac{1}{r} \left[\frac{d}{dr} \left(r \lambda \frac{dT}{dr} \right) \right] = 0. \quad (1)$$

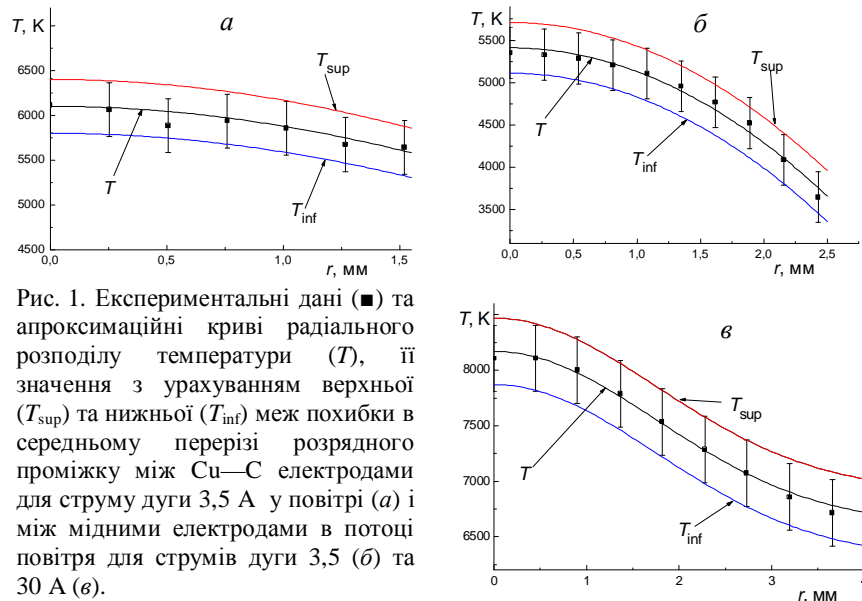


Рис. 1. Експериментальні дані (■) та апроксимаційні криві радіального розподілу температури (T), її значення з урахуванням верхньої (T_{sup}) та нижньої (T_{inf}) меж похибки в середньому перерізі розрядного проміжку між Cu—C електродами для струму дуги 3,5 А у повітрі (*a*) і між мідними електродами в потоці повітря для струмів дуги 3,5 (*б*) та 30 А (*в*).

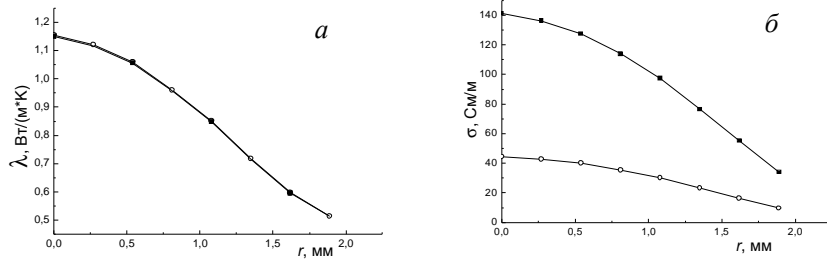


Рис. 2. Радіальні розподіли теплопровідності (а) та електропровідності (б) плазми в потоці повітря з домішками міді (■) та без неї (○).

Як уже зазначали, теплопровідність повітряної плазми слабко залежить від домішки електродного походження (через досить незначний її вміст у плазмі). Тому у співвідношенні (1) для досліджуваної плазмової суміші (повітря, вуглець, мідь) використали теплопровідність повітря без будь-якої домішки. Напруженість електричного поля E у позитивному стовпі електродугової плазми вимірювали додатково (рис. 3), змінюючи довжину розрядного проміжку L .

Зазначимо, що в досліджуваному діапазоні температур можна знехтувати втратами випромінювання. Отже, радіальний розподіл електропровідності можна обчислити таким чином:

$$\sigma(r) = -\frac{1}{rE^2} \left[\frac{d}{dr} \left(r\lambda \frac{dT}{dr} \right) \right]. \quad (2)$$

На рис. 4 показано радіальний розподіл електропровідності досліджуваної електродугової плазми. Обраховані за виразом (2) значення апроксимували функцією Гауса для трьох розподілів температур: T , T_{sup} та T_{inf} . Процедура апроксимації виконана з урахуванням вимоги, щоб одержане значення повного струму відповідало експериментальному. На наступному

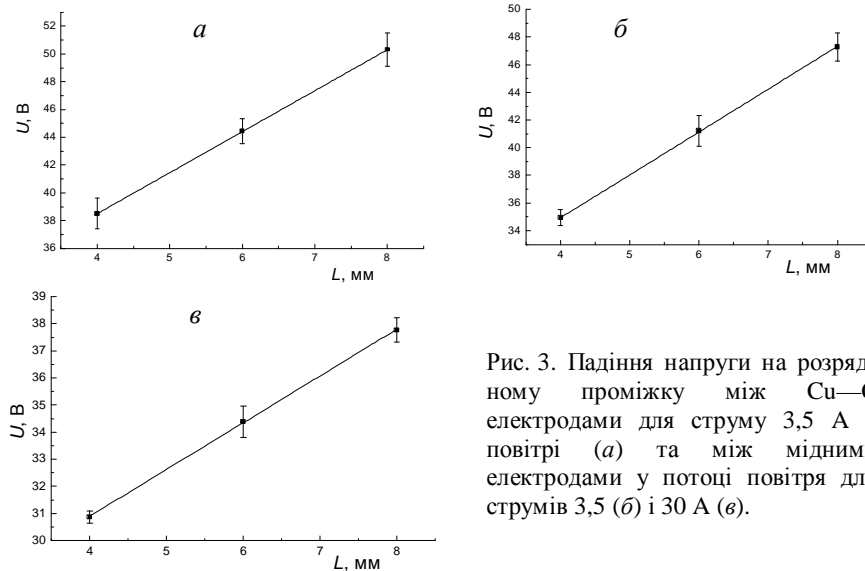


Рис. 3. Падіння напруги на розрядному проміжку між Cu—C електродами для струму 3,5 А у повітрі (а) та між мідними електродами у потоці повітря для струмів 3,5 (б) і 30 А (в).

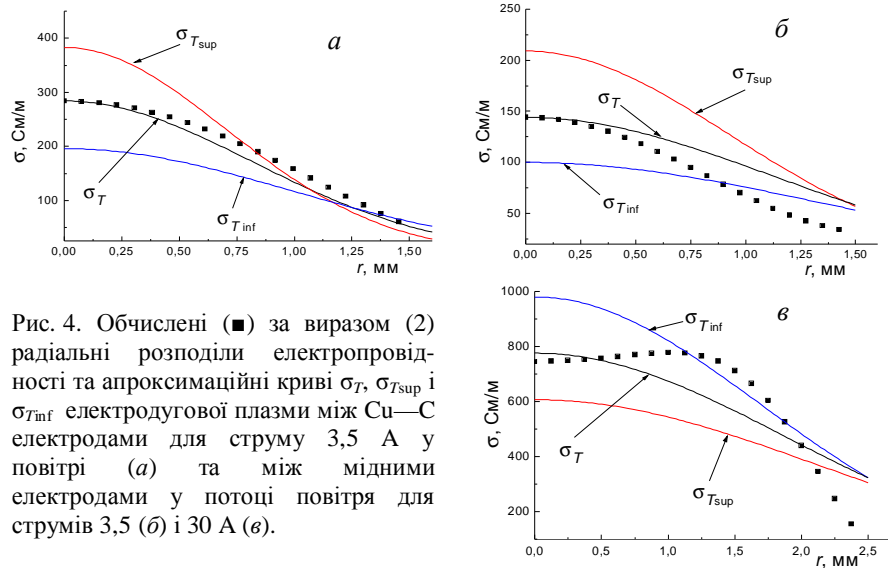


Рис. 4. Обчислені (■) за виразом (2) радіальні розподіли електропровідності та апроксимаційні криві σ_T , σ_{Tsup} і σ_{Tinf} електродугової плазми між Cu—C електродами для струму 3,5 А у повітрі (а) та між мідними електродами у потоці повітря для струмів 3,5 (б) і 30 А (в).

кроці з радіальних розподілів електропровідності розраховували розподіли електронної концентрації.

Обчислення електронної концентрації

Рухливість електронів значно вища за рухливість іонів, тому їх внеском у повний струм можна знехтувати. Тоді електропровідність плазми можна записати у вигляді

$$\sigma(r) = eN_e(r)\mu_e(r), \quad (3)$$

де e — елементарний електричний заряд; $N_e(r)$ — розподіл електронної концентрації; μ_e — рухливість електронів. Рухливість електронів можна записати через частоту зіткнень електрона з іншими частинками:

$$\mu_e(r) = \frac{e}{m_e v_i(r)}, \quad (4)$$

де m_e — маса електрона; v_i — повна частота зіткнень електрона з частинками усіх сортів:

$$v_i(r) = \sum_p v_{e-p}(r); \quad (5)$$

$$v_{e-p}(r) = N_p(r)u_e Q_{e-p}, \quad (6)$$

де v_{e-p} — частота зіткнень електрона з частинками сорту "p"; $N_p(r)$ — радіальний розподіл концентрації частинок сорту "p" та $u_e Q_{e-p}$ — середнє значення добутку швидкості електронів на переріз зіткнень електрона з частинками сорту "p". Вважаємо, що плазма перебуває у стані локальної термодинамічної рівноваги, тому для обрахунку середнього значення добутку $u_e Q_{e-p}$ у виразі (6) використали розподіл Максвелла. Отже, за виразами (3)—(6) можна обчислити електронну концентрацію. Особливості розрахунку складу плазми та визначення перерізу зіткнень детально розглянуті в роботі [8].

На рис. 5 зображено радіальні розподіли електронної концентрації в плазмі. Розрахунок профілів концентрації виконували із залученням електропровідностей плазми, які відповідають трьом різним кривим

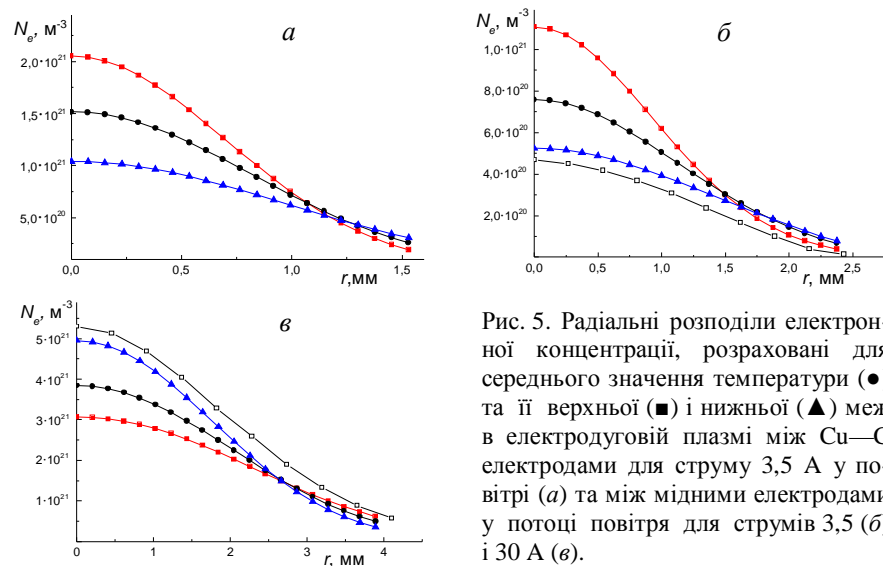


Рис. 5. Радіальні розподіли електронної концентрації, розраховані для середнього значення температури (●) та її верхньої (■) і нижньої (▲) меж в електродуговій плазмі між Cu—С електродами для струму 3,5 А у повітрі (а) та між мідними електродами у потоці повітря для струмів 3,5 (б) і 30 А (в).

температур T , T_{sup} та T_{inf} . У випадку електричної дуги між мідними електродами у потоці повітря для струмів 3,5 та 30 А додатково показано експериментально отримані радіальні розподіли електронної концентрації (рис. 5, б, в) [9]. Можна зробити висновок, що експериментальні та розраховані дані досить добре збігаються в межах задовільної похибки. На жаль, експериментальна перевірка електронної концентрації між композитними Cu—С електродами додатково була ускладнена помітним випромінюванням континууму. Проте обчислені теоретично розподіли електронної концентрації між цими електродами виглядають цілком прийнятними. На наступному етапі досліджень для визначення таких розподілів мають бути залучені інші експериментальні методики.

Висновки

Проведено комплексне експериментальне та розрахункове дослідження параметрів плазми вільно існуючої у повітрі електричної дуги між мідними та композитними Cu—С електродами:

методами оптичної емісійної спектроскопії виміряно радіальні розподіли температури та електронної концентрації плазми електродугового розряду в повітрі між композитними Cu—С та мідними електродами в потоці повітря;

розв'язком рівнянь енергетичного балансу отримано радіальні розподіли електропровідності плазмової суміші.

Розрахунки виконано у припущенні, що теплопровідність досліджуваної плазми не залежить від наявності в розрядному проміжку домішків міді та вуглецю. Розрахунок електронної концентрації в плазмі з відповідних радіальних розподілів електропровідності проводили за умови наявності локальної термодинамічної рівноваги в плазмі.

Обчислені у такий спосіб радіальні розподіли електронної концентрації в плазмі електродугового розряду між мідними електродами в потоці повітря добре узгоджуються із експериментальними даними. Тому

такий підхід можна рекомендувати для діагностики низькотемпературної термічної плазми з домішками міді та вуглецю.

Автори висловлюють подяку професору Валентину Яновичу Беренту за надання композитних матеріалів для виготовлення електродів.

1. *Берент В. Я.* Повышение эксплуатационных характеристик токосъемных элементов токоприемников на углеродной основе / В. Я. Берент, С. А. Гнездилов // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2009. — № 2. — С. 18—23.
2. *Miedzinski B.* Dynamics of sliding contacts in mine slow-speed railway transportation / [B. Miedzinski, W. Dzierzanowski, J. Wandzio et al.] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2012. — С. 63—69.
3. *Берент В. Я.* Совершенствование токосъемных элементов на углеродной основе полозов токоприемников электроподвижного состава / В. Я. Берент, С. А. Гнездилов // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2008. — № 8. — С. 9—15.
4. *Veklich A. N.* Technique of spectroscopic diagnostic of electric arc plasma / A. N. Veklich, V. Ye. Osidach // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Radiophysics & Electronics. — 2003. — No. 5. — P. 12—14.
5. *Veklich A. N.* Investigations of thermal plasma with metal impurities. Part II. Peculiarities of spectroscopy by W I, Mo I, Cu I spectral lines / [A. N. Veklich, A. V. Lebid, P. V. Soroka et al.] // Series: Plasma Problems of Atomic Science and Technology Physics. — 2013. — 19, No. 1. — P. 213—215.
6. *Бабіч І. Л.* Спектроскопія плазми електродугового розряду між композитними електродами Ag—CuO / [І. Л. Бабіч, В. Ф. Борецький, А. М. Веклич та ін.] // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2010. — С. 82—115.
7. *Veklich A. N.* The determination of electron density in electric arc discharge plasma / A. N. Veklich, V. Ye. Osidach // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Phys. & Mathematics. — 2004. — No. 2. — P. 428—435.
8. *Boretskij V. F.* Plasma of electric arc discharge in carbon dioxide with copper vapours / [V. F. Boretskij, Y. Cressault, Ph. Teulet, A. N. Veklich] // XIXth Symposium on Physics of Switching Arc. 5—9 September 2011, Brno, Czech Republic. — 2011. — P. 121—124.
9. *Boretskij V.* Non-equilibrium plasma properties of electric discharge in air between copper electrodes / [V. Boretskij, A. Veklich, Y. Cressault, A. Gleizes, Ph. Teulet] // Problem of Atomic Science and Technology. Plasma Physics. — 2012. — 18, No. 6. — P. 181—183.

Свойства плазмы электродугового разряда с примесями меди и углерода

А. Н. Веклич, С. А. Фесенко, В. Ф. Борецкий, Я. Крессо,
А. Глесс, Ф. Телье

Методами оптичної емісійної спектроскопії досліджено параметри термічної плазми електродугового розряду в повітрі між медними і композитними Si—C електродами. Предложено комплексний підхід для визначення радіальних розподілів електронної концентрації в плазмі, який об'єднує експериментальний і розрахунковий методи. Для розрахунку радіальних розподілів електронної концентрації розв'язано рівняння енергетичного балансу. В припущенні локального термодинамічного

равновесия в плазме из полученного профиля электропроводности рассчитано радиальное распределение электронной концентрации. Удовлетворительное совпадение полученных различными методами результатов свидетельствует, что апробированная методика диагностики может быть использована для исследования термической плазмы электродугового разряда с примесями меди и углерода.

Ключевые слова: термическая плазма, электродуговой разряд, температура, электронная концентрация, электропроводность, уравнение энергетического баланса.

Properties of plasma of electric arc discharge in air with admixing of copper and carbon

A. M. Veklich, S. O. Fesenko, V. F. Boretskij, Y. Cressault,
A. Gleizes and Ph. Teulet

The thermal plasma parameters of arc discharge in air between copper and Cu—C composite electrodes are investigated by optical emission spectroscopy. A complex approach, which combines both experimental and computational methods to determine the radial distributions of electron density in plasma, was developed. To calculate the radial distributions of electron density the energy balance equation is solved. In an assumption of local thermodynamic equilibrium in plasma the radial distribution of electron density is calculated from the obtained electrical conductivity profile. Satisfactory agreement between the results obtained by different methods shows that the testified diagnostic technique can be used for investigation of arc discharge thermal plasma with copper and carbon admixtures.

Keywords: thermal plasma, electric arc discharge, temperature, electron density, electronic conductivity, energy balance equation.