

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ЭЛЕКТРОХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

В среде математического пакета Matlab, с помощью метода конечных разностей, сделан анализ распределения напряженности электрического поля и плотности высокочастотного тока в электродах электрохирургических инструментов. Решена двухмерная эллиптическая задача, с граничными условиями первого и второго рода, которая моделирует толщину скин-эффекта в проводниках с осесимметричным поперечным сечением. Влиять на ширину зоны коагуляции биологической ткани, тем самым снизить перегрев живых биологических тканей и их некроз, возможно с помощью изменения частоты тока, формы и материала электродов. Разработанная математическая модель может применяться для проводников с разной электропроводностью в широком частотном диапазоне. Эта модель показывает, что глубина распространения плотности тока в электроды является одной из основных составных частей при разработке новых эффективных методов хирургического лечения. Увеличить площадь, которая проводит ток возможно за счет увеличения общей длины внешнего периметра электрода изменением формы его поперечного сечения благодаря удалению отдельных участков электрода.

Ключевые слова: высокочастотный ток, электрохирургические инструменты, электроды, скин-эффект, Matlab, метод конечных разностей.

ВВЕДЕНИЕ

Важным и востребованным в медицинской практике является решение прикладных задач связанных с использованием токов высокой частоты в электрохирургии при коагуляции [1–4] и сварке [5–7] живых биологических тканей.

Прохождение высокочастотного тока через проводящую среду вызывает неравномерное распределение плотности тока в поперечном сечении этой среды, это явление называется скин-эффект [8, 9], его необходимо учитывать при разработке новых эффективных методов лечения пациентов. Неравномерное распределение плотности тока в электродах электрохирургических инструментов влияет на градиент температур биологических тканей, которые контактируют с поверхностями электродов. Это снижает эффективность электрохирургического воздействия.

В работах [10, 11] моделируется прохождение тока при электрохирургических вмешательствах, но не учитывается действие скин-эффекта, что снижает практическую ценность полученных результатов.

Во многих областях хирургии для снижения излишней механической травматизации мягких биологических тканей при электрохирургических вмешательствах применяются инструменты с заокругленными электродами в форме эллиптических цилиндров и полуцилиндров. Примерами таких вмешательств могут служить: оториноларингологические операции; извлечение «вылущивание» опухолей из массива здоровых тканей; операции на легких, печени, селезенке и др. органах). Форма поперечного сечения электродов, в основном, в каждом конкретном случае, выбирается экспериментальным путем.

Проанализировать электромагнитные процессы в электродах возможно с помощью уравнений математической физики, представляющих собой дифференциальные уравнения в частных производных. Для решения задач в случае нескольких измерений используются численные итерационные методы, позволяющие дискретизировать т. е. представить производные в виде приближенных выражений (конечных разностей или конечных элементов), что позволяет преобразовать дифференциальные уравнения или их системы в системы алгебраических уравнений.

Численные методы решения практических задач подробно изложены в работах [12, 13]. Эти методы использованы нами для исследования стационарного двухмерного распределения плотности переменного тока в проводниках с осесимметричным поперечным сечением.

Данная работа носит методологический характер, потому что является логическим продолжением работ авторов по моделированию стационарного распределения плотности тока в электродах электрохирургических инструментов с разными поперечными сечениями: круглом – решена одномерная задача [14]; прямоугольном – решена двухмерная задача [15].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Использование математических методов моделирования при проектировании новых электрохирургических методов и инструмента, которые снижают перегрев живых биологических тканей и их некроз, представляет, как научную новизну, так и практический интерес и является актуальной задачей.

Основная цель проведения исследований – разработать методики анализа и проанализировать распределение плотности тока в электродах электрохирургических инструментов с осесимметричным поперечным сечением с учетом скин-эффекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент реализован для частоты переменного тока 440 кГц. Ток проходит через медный проводник ($\sigma = 57 \cdot 10^6 \text{ СМ/М}$) с поперечным сечением эллиптической формы, которая задается уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \tag{1}$$

где a – большая полуось (8 мм), b – малая полуось (4 мм).

Моделирование осуществлялось в среде математического пакета Matlab с помощью метода конечных разностей, который предполагает дискретизацию дифференциальных уравнений на так называемой прямоугольной координатной сетке, т. е. на сетке, элементарные ячейки которой представляют собой прямоугольники для двух измерений. Выбор метода конечных разностей обусловлен его преимуществами по сравнению с методом конечных элементов. Построение разностной схемы для эллиптических задач выполняется быстрее.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Переменное электромагнитное поле, для двухмерного случая, описывается уравнением [15]

$$-\frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial y^2} \right) + (j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)E(x,y) = 0, \tag{2}$$

где x, y – координаты; $E(x, y)$ – напряженность элект-

рического поля; μ – магнитная проницаемость проводящей среды; j – мнимая единица; ω – угловая частота; σ – удельная электропроводность; ε – диэлектрическая проницаемость проводящей среды.

Для изотропной среды в декартовой системе координат рассмотрим двухмерную стационарную задачу распределения плотности тока по поперечному сечению осесимметричного медного электрода. Используя симметрию поперечного сечения, будем искать изменение значения функции $E = E(x, y)$ только в I четверти. Граничное условие первого рода (Дирихле) на границе контура электрода и граничные условия второго рода (Неймана) на границах области x_{\min} та области y_{\min} показаны на рис. 1.

Граничное условие первого рода (Дирихле):

$$g_1(x, y) = E(x, y) = J / \sigma, \tag{3}$$

где J – плотность тока.

Граничные условия второго рода (Неймана):

$$g_2(y) = \frac{\partial E(0, y)}{\partial x} = 0; \tag{4}$$

$$g_3(x) = \frac{\partial E(x, 0)}{\partial y} = 0. \tag{5}$$

$g_1(x, y), g_2(y), g_3(x)$ – функции координат x и y .

Область решения задачи размещаем на равномерной сетке размерами 100x50.

Из уравнения (2) и граничных условий (3, 4, 5) составляем систему уравнений, которая в результате аппроксимации частных производных соответствующими конечными разностями, была преобразована в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

На рис. 2 представлено количество и размещение ненулевых элементов разреженной матрицы данной модели.

Ненулевые элементы прямоугольной матрицы коэффициентов СЛАУ представлены на рис. 3.

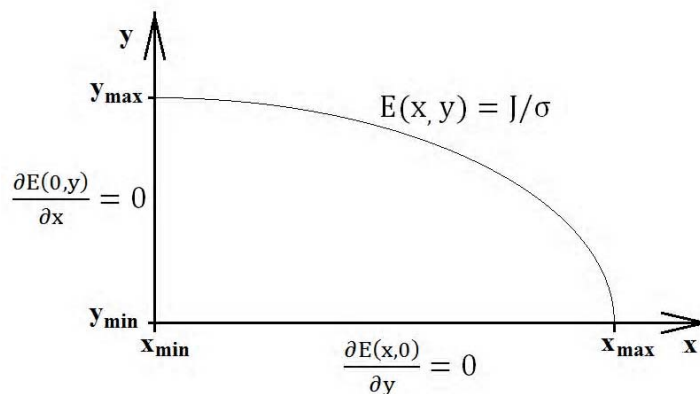


Рисунок 1 – Граничные условия модели

Решив эту СЛАУ, получили распределение напряженности электрического поля E в четверти поперечного сечения медного электрода (рис. 4).

Распределение плотности тока в медном осесимметричном электроде получили, используя формулу

$$J(x, y) = E(x, y) \cdot \sigma. \quad (6)$$

На рис. 5 показан результат математического моделирования распределения плотности тока в двумерном виде.

Также, графический редактор пакета Matlab позволяет проанализировать данную модель в трехмерном виде, где наглядно видно, что ток высокой частоты внутри электрода отсутствует (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанная двумерная математическая модель по определению толщины скин-слоя может применяться к осесимметричным электродам электрохирургических инструментов с разной электропроводностью в ши-

роком частотном диапазоне. Эта модель представляет собой двумерную эллиптическую задачу для моделирования скин-эффекта в проводниках.

Наглядно видно, что ток высокой частоты внутри электрода почти не течет.

Увеличить площадь, которая проводит ток, возможно за счет увеличения общей длины внешнего периметра электрода изменением формы его поперечного сечения благодаря удалению отдельных участков электрода.

Дальнейшим развитием данного исследования станет разработка математических моделей распределения переменного тока в электродах электрохирургических инструментов со сложной геометрической формой поперечного сечения.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель распределения напряженности электрического поля и плотности тока, которая позволяет анализировать электромагнитные процессы происходящие в осесимметричных электродах

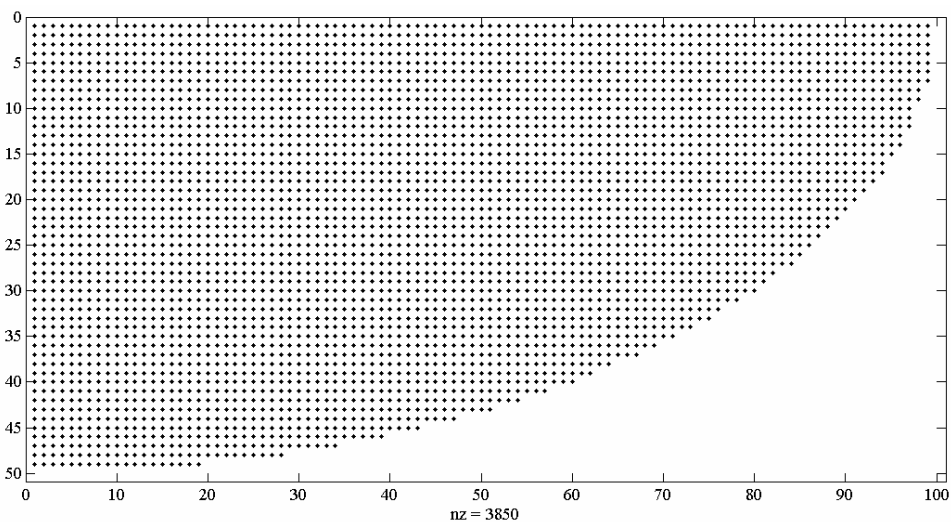


Рисунок 2 – Зеркальное изображение ненулевых элементов разреженной матрицы (nz-ненулевые элементы)

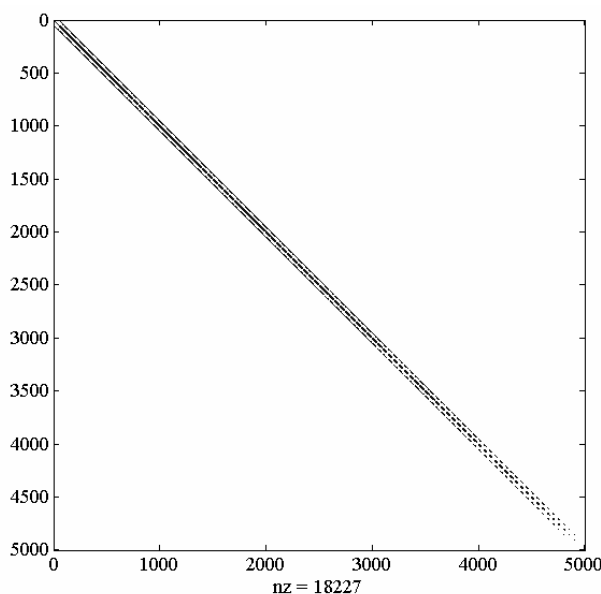


Рисунок 3 – Ненулевые элементы матрицы коэффициентов

электрохирургических инструментов.

Влиять на ширину зоны коагуляции биологической ткани, тем самым снизить перегрев живых биологических тканей и их некроз, возможно с помощью изменения частоты тока, формы и материала электродов.

В отличие от существующего взгляда, что действие

поверхностного эффекта можна не учитывать, при моделировании распределения плотности тока в электрохирургии, эта стационарная двумерная модель показывает, что глубина распространения плотности тока в электроды является одной из основных составных частей при разработке новых эффективных методов хирургического лечения.

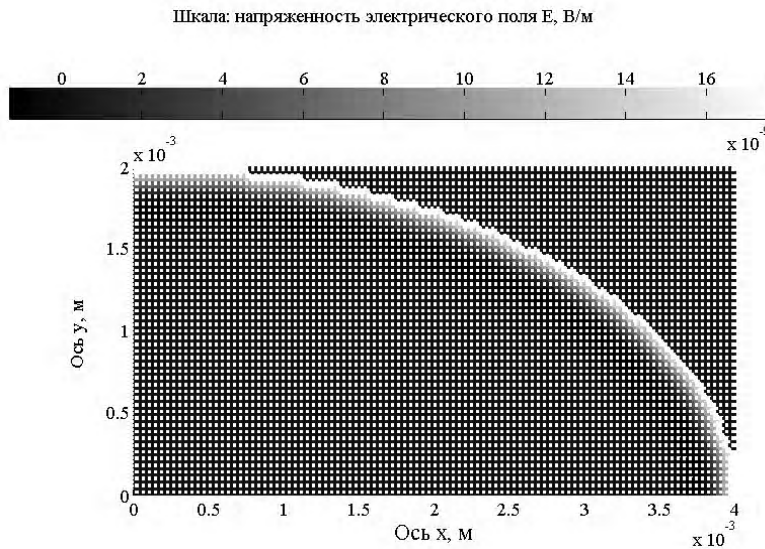


Рисунок 4 – Распределение напряженности электрического поля

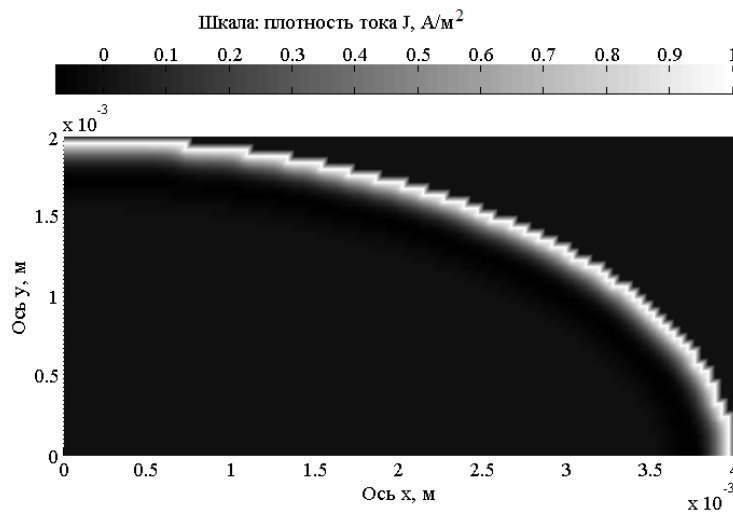


Рисунок 5 – Двумерное распределение плотности тока в четверти медного осесимметричного электрода

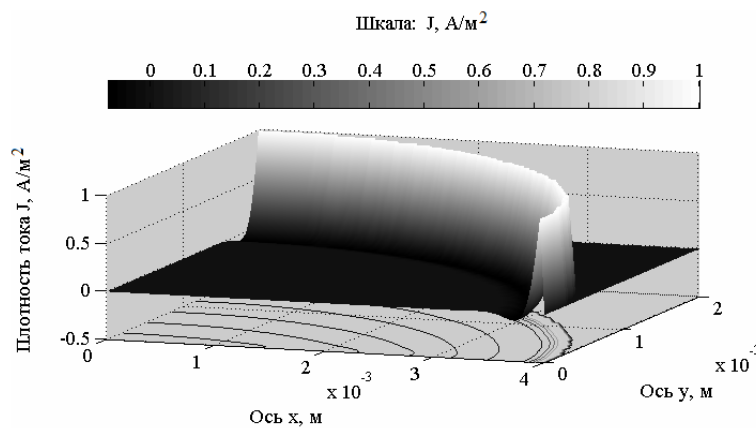


Рисунок 6 –Трехмерный вид распределения плотности тока

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карпухин В. А. Исследование термоэлектрических характеристик артериол при биполярной электрокоагуляции / В. А. Карпухин, З. А. Сидорова, О. А. Макарян // 13-я НТК «Медикотехнические технологии на страже здоровья» (Медтех -2011): сб. тр. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – С. 149–151.
2. Dodde R. E. Monopolar electrosurgical thermal management for minimizing tissue damage / R. E. Dodde, J. S. Gee, J. D. Geiger, A. J. Shih // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2012. – Vol. 59, Issue 1. – P. 167–173. doi: 10.1109/TBME.2011.2168956.
3. Белов С. В. Исследование принципов электрохирургических воздействий и разработка научных основ проектирования аппаратов и устройств для высокочастотной электрохирургии / С. В. Белов, автореф. дис. ... докт. техн. наук. // – М. : – 2004. – 53 с.
4. Kuroda Y. Electrical-thermal-structural coupling simulation for electrosurgery simulators / Y. Kuroda, S. Tanaka, M. Imura, O. Oshiro // 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS. IEEE Publ. – 2011. – P. 322–325. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090084.
5. Патон Б. Е. Электрическая сварка мягких тканей в хирургии / Б. Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2004. – № 9. – С. 7–11.
6. Лебедев А. В. Особенности применения теории контактной сварки металлов к сварке живых тканей / А. В. Лебедев, А. Г. Дубко // Технічна електродинаміка. – 2012. – Вип. 2. – С. 187–192.
7. Уманец Н. Н. Ультроструктурные изменения сосудистой оболочки и сетчатки глаза кролика непосредственно после воздействия различных режимов высокочастотной электросварки биологических тканей / Н. Н. Уманец, В. А. Науменко, Н. Е. Думброва, Н. И. Молчанюк, Р. Э. Назаретян // Журнал НАМН Украины. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 359–364.
8. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Том VIII. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц // – М. : Наука. – 1982. – 623 с.
9. Kosek M. Skin effect in massive conductors at technical frequencies / M. Kosek, M. Truhlar, A. Richter // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 Issue 5. – 2011. – P. 179–185.
10. Tungjitkusolmun S. Finite Element Analyses for a Study of Hepatic Cancer Tissue Destruction using Monopolar and Bipolar Radio-Frequency Ablation / S. Tungjitkusolmun // INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED BIOMEDICAL ENGINEERING Vol. 2, Issue 1. – 2009. – P. 33–38.
11. Suarez A. G. Mathematical modeling of epicardial RF ablation of atrial tissue with overlying epicardial fat / A. G. Suarez, F. Hornero, E. J. Berjano // The Open Biomedical Engineering Journal. – 2010. – Vol. 4, Issue 1. – P. 47–55. doi: 10.2174/1874120701004010047.
12. Morton K. W. Numerical Solution of Partial Differential Equations / K. W. Morton, D. Mayers. // Cambridge University Press. Second Edition. – 2005. – 279 p.
13. Каханер Д. Численные методы и программное обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Неш. // – М. : Мир. – 1998. – 575 с.
14. Сидорець В. М. Розподіл струму в електродах електрохірургічних інструментів при зварюванні біологічних тканин / В. М. Сидорець, А. Г. Дубко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 3. – С. 24–28. doi:10.15587/1729-4061.2015.43372.
15. Sydorets V. Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery / V. Sydorets, A. Lebedev, A. Dubko. // 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Lviv, Ukraine. – 2015. – P. 215–217. doi: 10.1109/CPEE.2015.7333379.

Статья поступила в редакцию 30.11.2015

Сидорець В. М.¹, Дубко А. Г.²

¹Професор, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

²Канд. техн. наук, старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

ОСОБЛИВОСТІ АНАЛІЗУ РОЗПОДІЛУ СТРУМУ ВИСОКОЇ ЧАСТОТИ В ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ЕЛЕКТРОДАХ ЕЛЕКТРОХІРУРГІЧНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

У середовищі математичного пакета Matlab, за допомогою методу кінцевих різниць, зроблено аналіз розподілу напруженості електричного поля та щільності високочастотного струму в електродах електрохірургічних інструментів. Вирішена двовимірна еліптична задача, з граничними умовами першого та другого роду, яка моделює товщину шкіно-ефекту в провідниках з вісесиметричним поперечним перерізом. Впливати на ширину зони коагуляції біологічної тканини, тим самим знизити перегрів живих біологічних тканин та їх некроз, можливо з допомогою зміни частоти струму, форми і матеріалу електродів. Розроблена математична модель може застосовуватися для провідників з різною електропровідністю в широкому частотному діапазоні. Ця модель показує, що глибина поширення щільності струму в електродах є однією з основних складових частин при розробці нових ефективних методів хірургічного лікування. Збільшити площу, яка проводить струм можливо за рахунок збільшення загальної довжини зовнішнього периметра електрода зміною форми його поперечного перерізу завдяки видалення окремих ділянок електрода.

Ключові слова: високочастотний струм, електрохірургічні інструменти, електроди, шкіно-ефект, Matlab, метод кінцевих різниць.

Sydorets V. M.¹, Dubko A. G.²

¹Professor, Dr. Sci., Leading Researcher E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine

²PhD (Candidate of technical science), Senior Staff Scientist E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine

THE ANALYSIS PECULIARITIES OF HIGH FREQUENCY CURRENT DISTRIBUTION IN AXIS SYMMETRIC ELECTRODES FOR ELECTROSURGICAL INSTRUMENTS

In the environment of mathematical package Matlab, using finite difference method, the analysis of the electric field intensity distribution and the high frequency current density in the electrodes of electrosurgical instruments was performed. Two-dimensional elliptic problem, with boundary conditions of the first and second kind, which models the skin effect thickness in conductors with axis-symmetric-cross-section was solved. The mathematical model clearly shows that almost no high-frequency current flows inside the electrode. The mathematical model can be used for conductors with different conductivity in a wide frequency range. The increase of the electrode cross section area, which conducts current, is possible by increasing the overall length of the electrode outer perimeter by changing its cross section shape thanks to the electrode parts be removed..

Keywords: high-frequency current, electrosurgical tools, electrodes, skin effect, Matlab, method of finite differences.

REFERENCES

1. Karpukhin V. A., Sidorova, Z. A., Makaryan, O. A. Issledovanie termoelektricheskikh kharakteristik arteriol piy bipoliarnoi elektrokoagulyatsii. 13-ia NTK “Mediko-tekhnicheskie tekhnologii nastrazhe zdorovia” sb. tr. (Medtekh–2011), 149–151.
2. Dodde R. E., Gee J. S., Geiger J. D., Shih A. J. Monopolar electrosurgical thermal management for minimizing tissue damage. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2012, 59(1), 167–173. doi: 10.1109/TBME.2011.2168956.
3. Belov S. V. Issledovanie printsipov elektrokhirurgicheskikh vozdeistvii I razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniya apparatov I ustroystv dlya vysokochastotnoi elektrokhirurgii. Avtoref. dokt. diss, 2004, Moscow, 53.
4. Kuroda Y., Tanaka S., Imura M., Oshiro O. Electrical-thermal-structural coupling simulation for electrosurgery simulators. Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC. IEEE Publ., 2011, 322-325. doi: 10.1109/IEMBS.2011.6090084.
5. Paton B. E. Elektricheskaya svarka myagkikh tkaney v khiryrgii. (2004). Avtomaticheskaya svarka, 9, 7–11.
6. Lebedev A. V., Dubko A. G.). Osobennosti primeneniya teorii kontaktnoy svarki metallov k svarke zhivih tkaney. 2012, Tehnichna elektrodinamika, 2, 187–192.
7. Umanets N. N., Naumenko V. A., Dumbrova N. E., Molchanyuk, N. I., Nazaretyan, R. E. Ultrastrukturnie izmeneniya sosudistoy obolochki I setchatki glaza krolika neposredstvenno posle vozdeystviya razlichnih rezhimov visokochastotnoy elektrosvarki biologicheskikh tkaney. 2014, ZhurnalNAMN Ukraini, 20 (3), 359–364.
8. Landau L. D., Lifshits E. M. Teoreticheskaya fizika. 1982, Tom VIII. Elektrodinamikasploshnikhsred. M. Nauka, 623.
9. Kosek M., Truhlar M., Richter A. Skin effect in massive conductors at technical frequencies. 2011, PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review) 5, 179–185.
10. Tungjitkusolmun S. Finite Element Analyses for a Study of Hepatic Cancer Tissue Destruction using Monopolar and Bipolar Radio-Frequency Ablation. 2009, INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED BIOMEDICAL ENGINEERING, 2(1), 33–38.
11. Suarez A. G., Hornero F., Berjano, E. J. Mathematical modeling of epicardial RF ablation of atrial tissue with overlying epicardial fat. The Open Biomedical Engineering Journal, 2010, 4 (1), 47–55. doi: 10.2174/1874120701004010047.
12. Morton K. W., Mayers D. Numerical Solution of Partial Differential Equations. Second Edition. 2005, Cambridge University Press, 279.
13. Kakhner D., Mouler K., Nesh S. Chislennyye metody i programmnoe obespechenie. 1998, M. Mir, 575.
14. Sydorets V. M., Dubko A. G. Rozpodil strumu v elektrodakh elektrokhirurgichnykh instrumentiv pry zvaryuvanni biologichnykh tkanyn. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, 2015, 3, 24–28. doi:10.15587/1729-4061.2015.43372.
15. Sydorets V., Lebedev A., Dubko A. Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery. 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2015, Lviv, Ukraine, 215–217. doi: 10.1109/CPEE.2015.7333379.