

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-136-149>



## К разработке инжекционных катодных электродов для ЭГД-преобразователей

А. Е. Кузько<sup>1</sup> ✉, А. И. Жакин<sup>1</sup>, А. В. Кузько<sup>1</sup>, Н. М. Игнатенко<sup>1</sup>, Е. С. Барсук<sup>1</sup>,  
М. О. Зубарева<sup>1</sup>, М. А. Бондарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: kuzko@mail.ru

### Резюме

**Цель.** Изучить возможность изменения катодной инжекции в сеточном осесимметричном электрогидродинамическом преобразователе с плоскопараллельными модифицированными электродами.

**Методы.** Методом численного моделирования получена оценка влияния краевого эффекта электродных сеток на поверхностную проводимость в периферии межэлектродного промежутка и определена оптимальная геометрия держателей электродов сеточного ЭГД-преобразователя. Методом численного расчёта в программной среде Agros 2D, а также с помощью анализа сканов растрового электронного микроскопа (РЭМ) и метода оценки форм-фактора структур получены параметры локальных электрических полей структур поверхностей проволок сеточных электродов, подвергнутых модификации при лазерном скрайбировании.

**Результаты.** Приводятся результаты разработки сеточной системы электродов для электрогидродинамических преобразователей с усилением катодной инжекции зарядов. Анализируется влияние краевого эффекта на работу ЭГД-преобразователей. Описана возможность усовершенствования сеточной электродной системы модельного ЭГД-насоса. Исследован состав, форма микро- и наноструктур после скрайбирования на лазерном маркирующем комплексе FMark-20RL. Сделана качественная оценка значения напряжённости локального электрического поля на наноструктурах, полученных лазерным скрайбированием латунных сеток, с характерным радиусом 50 нм, которая свидетельствует об усилении катодной инжекции отрицательных зарядов в ЭГД-системе. При расстоянии между электродами 1,5 мм и разности потенциалов между электродами 1,5 кВ/см величина локальной напряжённости на вершине наноструктуры радиусом кривизны порядка 50 нм может достигать  $5,5 \cdot 10^7$  В/см.

**Заключение.** Лазерное скрайбирование в виде концентрических окружностей латунных сеточных электродов позволяет интенсифицировать катодную инжекцию зарядов за счёт усиления локальных электрических полей с микро- и наноструктур. Использование диэлектрических держателей из плексигласа способно уменьшать поверхностные токи утечки на периферии сеточных электродов.

**Ключевые слова:** инжекция зарядов; электрогидродинамический преобразователь; модифицирование электродов; лазерное скрайбирование; статический напор; наноструктуры.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (з/з 2020 № 0851-2020-0035), в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

© Кузько А. Е., Жакин А. И., Кузько А. В., Игнатенко Н. М., Барсук Е. С., Зубарева М. О.,  
Бондарев М. А., 2023

**Для цитирования:** К разработке инжекционных катодных электродов для ЭГД-преобразователей / А. Е. Кузько, А. И. Жакин, А. В. Кузько, Н. М. Игнатенко, Е. С. Барсук, М. О. Зубарева, М. А. Бондарев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 12. С. 136–149. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-136-149>

Поступила в редакцию 10.03.2023

Подписана в печать 21.04.2023

Опубликована 30.05.2023

## On the Development of Injection Cathode Electrodes for EHD Transducers

Andrey E. Kuzko<sup>1</sup> ✉, Anatoly I. Zhakin<sup>1</sup>, Anna V. Kuzko<sup>1</sup>, Nikolai M. Ignatenko<sup>1</sup>, Elizaveta S. Barsuk<sup>1</sup>, Maria O. Zubareva<sup>1</sup>, Mikhail A. Bondarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: kuzko@mail.ru

### Abstract

**Purpose** To study the possibility of changing cathode injection in a grid axisymmetric EHD transducer with plane-parallel modified electrodes.

**Methods.** An estimate of the influence of the edge effect of electrode grids on the surface conductivity in the periphery of the interelectrode gap was obtained by numerical simulation, and the optimal geometry of the electrode holders of the grid EHD transducer was determined. Using the method of numerical calculation in the software environment Agros 2D, as well as using the analysis of SEM scans and the method of estimating the form factor of structures, the parameters of local electric fields of the structures of the surfaces of wires of grid electrodes modified during laser scribing were obtained.

**Results.** The results of the development of a grid system of electrodes for electrohydrodynamic converters with enhanced cathodic charge injection are presented. The influence of the edge effect on the operation of EHD transducers is analyzed. The possibility of improving the grid electrode system of a model EHD pump is described. The composition and shape of micro- and nanostructures after scribing on the FMark-20RL laser marking complex have been studied. A qualitative estimate of the local electric field strength on nanostructures obtained by laser scribing of brass grids with a characteristic radius of 50 nm is made, which indicates an increase in the cathode injection of negative charges in the EHD system. With a distance between the electrodes of 1.5 mm and a potential difference between the electrodes of 1.5 kV/cm, the magnitude of the local tension at the top of the nanostructure with a curvature radius of about 50 nm can reach  $5.5 \cdot 10^7$  V/cm.

**Conclusion.** Laser scribing in the form of concentric circles of brass grid electrodes makes it possible to intensify cathodic charge injection by amplifying local electric fields from micro- and nanostructures. The use of plexiglass dielectric holders can reduce surface leakage currents at the periphery of grid electrodes.

**Keywords:** charge injection; electrohydrodynamic converter; electrode modification; laser scribing; static head; nanostructures.

**Financing:** The study was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (g/z 2020 No. 0851-2020-0035), as part of the strategic academic leadership program "Priority-2030" (Agreement No. 075-15-2021-1213).

**Conflict of interest:** The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Kuzko A. E., Zhakin A. I., Kuzko A. V., Ignatenko N. M., Barsuk E. S., Zubareva M. O., Bondarev M. A. On the Development of Injection Cathode Electrodes for EHD Transducers. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023; 13(2): 136–149. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-136-149>

Received 10.03.2023

Accepted 21.04.2023

Published 30.05.2023

\*\*\*

## Введение

Важным практическим приложением электрогидродинамики (ЭГД) является создание действующих ЭГД-преобразователей, работающих в устройствах тепло- и массообмена, в химических реакторах для эффективного перемешивания реагентов, в устройствах автоматики в качестве исполнительных элементов. Сеточные, или решётчатые, ЭГД-преобразователи с сеточными, или решётчатыми, электродами привлекают исследователей их высокими [1; 2], по сравнению с игольчатыми, расходными характеристиками и меньше выраженными деструктивными процессами поверхности электродов вследствие электрохимических процессов [3]. Однако, несмотря на кажущуюся простоту реализации и совокупность положительных свойств, широкого применения ЭГД-преобразователей до сегодняшнего дня не наблюдается. Важной причиной этого является сложность в задании инжекции зарядов с поверхностями электродов вследствие её зависимости от реальной микро- и наноструктуры инжектирующих электродов. В связи с этим наблюдаются два актуальных направления в исследовании повышения эффективности ЭГД-преобразователей, связанных с наличием размерных эффектов, под которыми понимают комплекс процессов, протекающих с изменением свойств материалов (например, механических, сегнетоэлектрических, ферромагнитных и др.) при переходе к микронному и нанометровому диапазону [4–6].

Одним из них является изучение возможности управления зарядообразованием путём создания поверхности, на которой будут находиться организованные в

определённом порядке микро- и наноструктуры [7], геометрией и расположением которых при поверхностной модификации электродов можно контролировать инжекционный процесс [8–10]. Искусственное создание упорядоченных структур в настоящее время наукоёмко и дорогостояще, т. к. требует уникального оборудования. Поэтому для управления зарядообразованием следует исследовать возможность использования свойств самоорганизованных ансамблей наносистем, полученные в специально организованных условиях [7; 11; 12]. Так, самоорганизованные модифицированием поверхности электродов в определённом порядке микро- и наноструктуры, на вершинах которых в электрическом поле будут образовываться области с высокой напряжённостью, выступают в качестве центров инжекции и разрядки зарядов [11–13], а также влияют на неравновесность диссоционно-рекомбинационных процессов в объёме рабочей диэлектрической жидкости в межэлектродном промежутке [14].

Другое направление связано с функционализацией диэлектрических жидкостей наномасштабными объектами (добавлением в оптимальной концентрации многостенных и функционализированных углеродных нанотрубок (УНТ), гибридного  $\text{SiO}_2$  – графена, наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.) и влиянием этих примесных добавок на электрофизические свойства рабочих жидкостей, в частности на интенсификацию ЭГД-течений, перенос зарядов и электрохимические процессы на межфазной границе жидкий диэлектрик – металлический электрод [15–17]. Необходимо

отметить сложность в теоретическом описании и предсказании влияния размерных эффектов на электрофизические свойства систем, что показывает важность экспериментальных исследований подобных ЭГД-систем. Наличие эрозивных процессов деградации структур электродов при электрохимических процессах на границе раздела фаз объясняет использование антикоррозионных покрытий типа TiN [18].

### Материалы и методы

Реальные диэлектрические системы имеют конечные размеры, которые обуславливают возникновение искажений поля у краев плоских электродов вследствие краевого эффекта. В этой области напряжённость неоднородна, а силовые линии искривлены [19]. Учёт краевого эффекта приводит к изменению распределения поля в окрестности торцов проводников, поскольку наличие электрического заряда на концах пластин способствует усилению электрического поля между ними и его выходу за пределы системы. Для ЭГД-течений это создаёт дополнительные проблемы – значительные течения жидкого диэлектрика реализуются не в основном межэлектродном промежутке, а на периферии электродов, или возникают токи утечки из-за поверхностной проводимости по стенкам канала или держателей электродов. Так как для ЭГД-преобразователей характерны подобные явления и использование высоких напряжений, то, кроме того, возникает опасность пробоя, а также возникновения коронного разряда. В связи с этим является актуальным усовершенствование электродных систем таких устройств за счёт правильно подобранной геометрии расположения электродов и использования специальных диэлектрических материалов

для держателей электродов и соответственно их формы. Так, например, в работе [20] предлагается конструктивное усовершенствование электродных систем типа «провод – провод» для ослабления выноса заряда за пределы межэлектродного промежутка и повышения интенсивности ЭГД-течений.

На рисунке 1 представлена модель осесимметричного сеточного ЭГД-преобразователя с электродами, впаянными на одинаковую глубину в диэлектрические держатели из полиметилметакрилата  $(C_5O_2H_8)_n$  с удельной проводимостью  $10^{-15}$  См/м, так что торцы проволочек сетки оказываются погруженными в диэлектрик (рис. 1, б). В качестве электродов использованы латунные сетки диаметром 12 мм, размером квадратной ячейки 1 мм, при толщине проволоки 515 мкм (рис. 1, в). Для дополнительного подавления краевых неоднородностей электрического поля и исключения токовых утечек периферия сеточных электродов покрывалась двумя слоями полиуретанового лака URETHANE CLEAR (фирмы CRAMOLIN) с электрической прочностью 82,9 кВ/мм и удельным объёмным сопротивлением  $5,1 \cdot 10^{14}$  Ом·см.

Оценка влияния диэлектрических держателей для сеток на распределение электрического поля между электродами была выполнена в программной среде Agros 2D, которая позволяет решать задачу в планарной и осесимметричной области методом конечных элементов [22]. Среда имеет несколько программных модулей, осуществляющих процесс моделирования и визуализации полученного решения (поддерживает поля: электростатику, электрические токи, магнитные поля, радиочастотные поля (RF-поля), теплопередачу, структурные, механику, акустику, поток жидкости).



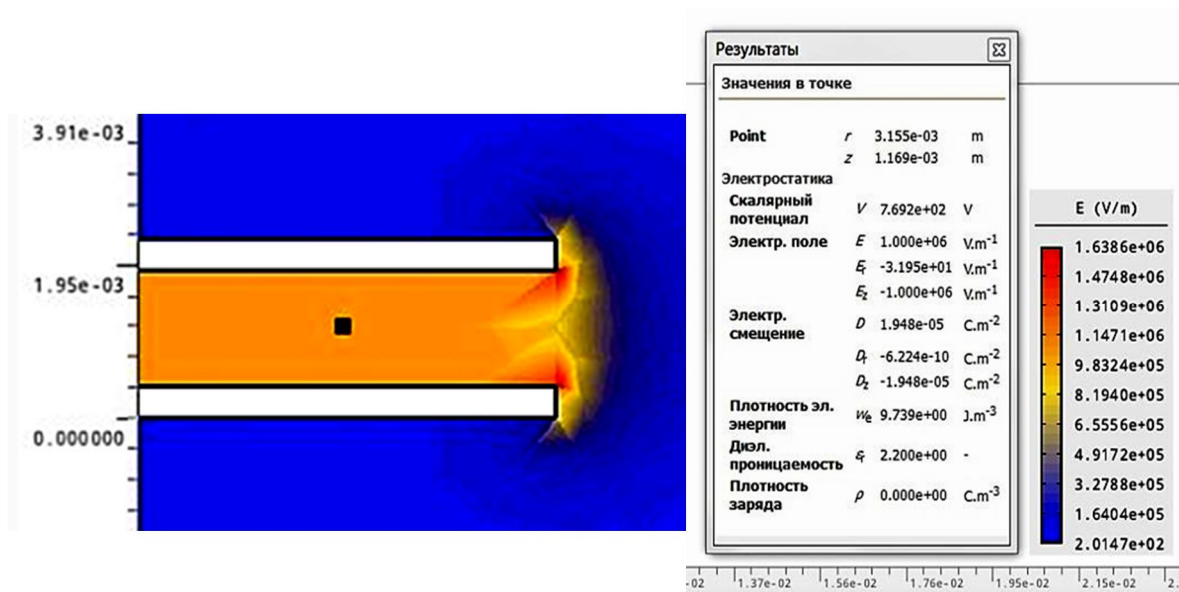


Рис. 2. Визуализация электрического поля межэлектродного промежутка без держателей

Fig. 2. Visualization of the electric field of the interelectrode gap without holders

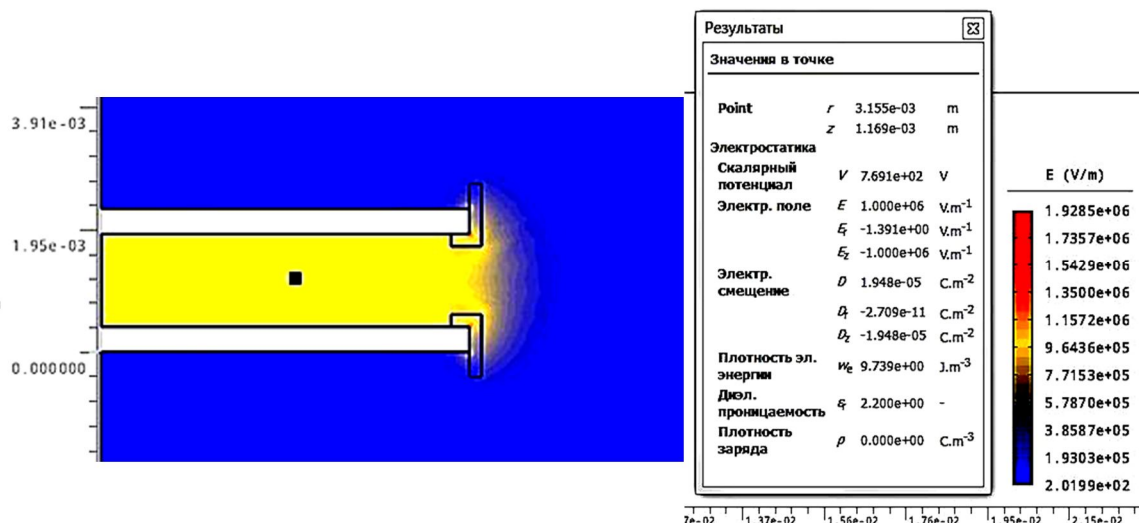
На рисунке 2 показано, что края электродов создают напряженность электрического поля в 1,7 раза выше, чем средняя напряжённость однородного поля в центре промежутка. Для снижения краевого эффекта прибегают к увеличению радиуса кривизны на периферии электродов (электроды Роговского), однако малые размеры диаметра проволочек этого не позволяют сделать. Уменьшения краевого эффекта можно добиться помещением электродов, не изменяя их формы, в держатели специальной формы из диэлектрических материалов, которые, с одной стороны, будут нивелировать влияние краевых эффектов, с другой – уменьшать величину поверхностной проводимости по стенкам канала.

При тех же самых геометрических параметрах и жидкости для визуализации электрического поля электродов с держателями в Agros 2D была построена аналогичная модель, материал держателей – плексиглас (диэлектрическая проницаемость 3,5). После дискретизации области

решения задачи сеточной функцией при запуске постпроцессора поле провизуализировано с помощью цвета (рис. 3). Картина визуализации электрического поля показывает, что увеличения напряжённости электрического поля на периферии сеток не происходит. Использование диэлектрических держателей позволяет сгладить краевой эффект, уменьшить величину пробивного напряжения и поверхностных токов. Усиления ЭГД-течений из-за краевого эффекта не будет возникать.

Повышение локальной напряженности на зарядообразующих центрах в виде обнаруженных наноструктур [23] вплоть до нескольких десятков киловольт на сантиметр может сопровождаться, согласно эффекту Вина, сильной нелинейной зависимостью плотности тока от напряжённости электрического поля и, как следствие, достижением режима развитой электроконвекции при значениях намного меньших средних стандартных  $\sim 1 \text{ кВ/см}$ .





**Рис. 3.** Визуализация электрического поля межэлектродного промежутка с держателями электродов из плексигласа

**Fig. 3.** Visualization of the Electric Field of the Interelectrode Gap with Plexiglas Electrode Holders

Проведём оценку локальных напряжённостей электрических полей, создаваемых начиная с макроуровня (выпуклостей проволоки сетки из-за изгиба на их пересечениях) и заканчивая наноструктурами, возникшими в результате лазерного скрайбирования на лазерном комплексе FMark-20RL или магнетронного напыления на установке МВУ ТМ Магна Т.

На рисунке 4, а показан результат моделирования локальных электрических полей на изгибах плетения проволоки сетки (рис. 4, в) в программной среде Agros 2D. Для оценки средней напряжённости  $E_0$  в межэлектродном промежутке анод-катод, с учётом малости размеров изгиба сетки по сравнению с расстоянием между электродами, принято, что противозлектрод имеет плоскую поверхность. Выступы переплетений проволоки неструктурированного сеточного электрода имеют профиль, близкий к параболическому. Радиус закругления вершины выступа нижнего электрода равен порядка 58 мкм (рис. 4, а). Расстояние между электродами бралось 1,5 мм, рабочим напряжением для оценки в системе анод-катод считалось 1,5 кВ. Расчёты проведены без учёта двойных электрических слоёв.

Элементный анализ используемых в электродах сеток до и после лазерного скрайбирования показал одинаковый состав (рис. 4, б), что соответствует латуни марки Л-63 (Cu – атомный вес ~64%, Zn –34%).

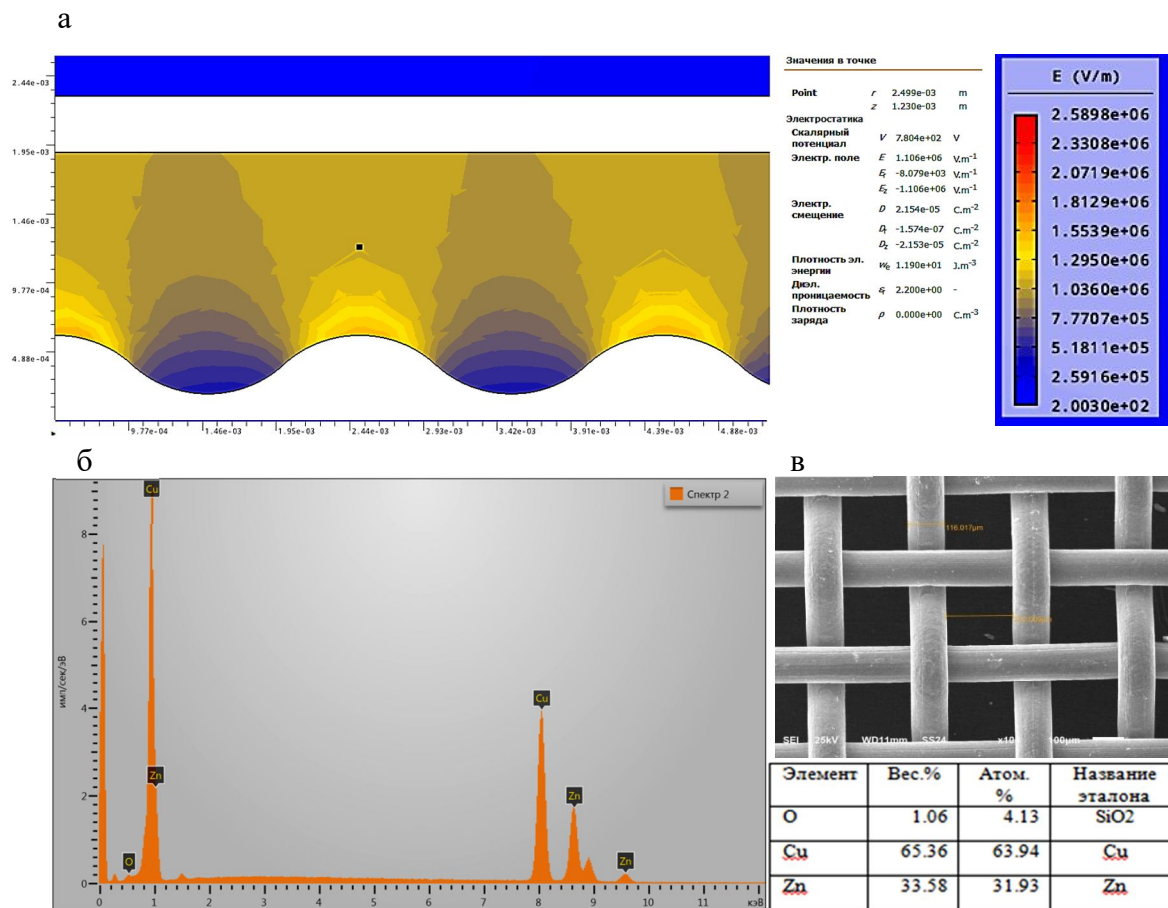
Зарядообразование и интенсивность электроконвекции со структур электродов, обладающих развитой поверхностью, будет посредством эффекта Вина существенно определяться форм-фактором  $\beta$  (см<sup>-1</sup>) [2; 14]:

$$\beta = \frac{E_{loc}}{U}, \quad (1)$$

где  $E_{loc}$  – локальная напряженность на вершине структуры;  $U$  – разность потенциалов электрического поля между катодом и анодом. Значение  $\beta$  определяется формой и размерами отдельной структуры электрода и определяет локальное усиление электрического поля на её выступающей части (вершине) [23]:

$$\beta = \frac{2}{R \ln(2H / R)}, \quad (2)$$

где  $H$  – расстояние между эмитирующей частью и плоским противозлектродом;  $R$  – радиус кривизны на вершине структуры.



**Рис. 4.** Макроскопическая модель сеточного электрода: а – визуализация локальных электрических полей на изгибах проволочек сетки; б – энергодисперсионный спектр элементного состава электродов; в – РЭМ-изображение решеточного электрода с размером ячейки 0,2 мм при увеличении в 100 раз (РЭМ JEOL JSM 6610 Iv)

**Fig. 4.** Macroscopic model of the grid electrode: а – visualization of local electric fields at the bends of the grid wires; б – energy-dispersive spectrum of the elemental composition of the electrodes; в – REM image of a grating electrode with a cell size of 0.2 mm at a magnification of 100 times (REM JEOL JSM 6610 Iv)

Для радиуса кривизны  $R_1 = 58$  мкм (см. рис. 4, а) по выражению (2) для усиления поля выступом проволочки имеем значение форм-фактора  $\beta_1 \cong 9,1 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ . Тогда из (1) найдём величину локальной напряженности на вершине выступа  $E_{\text{loc1}} \cong 136 \text{ кВ/см}$  (при средней напряжённости в межэлектродном промежутке (см. рис. 4, а)  $E_0 = 11 \text{ кВ/см}$ ). Таким образом, получаем коэффициент усиления поля ( $E_{\text{loc1}}/E_0$ ) на изгибах проволочки порядка 12.

Теперь проведём вычисления для локальных полей поверхности электродов

после структурирования посредством лазерной абляции. На поверхности сетки, на случай пуазейлевского ЭГД-течения, скрайбирование произведено по концентрическим окружностям с шагом 50 мкм (рис. 5, а). В результате абляции образованы «бороздки» (рис. 5, б), средний радиус закругления вершин («гребней») которых определён оценочно по РЭМ-сканам (JEOL JSM 6610 Iv) и равен  $R_2 \cong 15$  мкм (рис. 5, в).

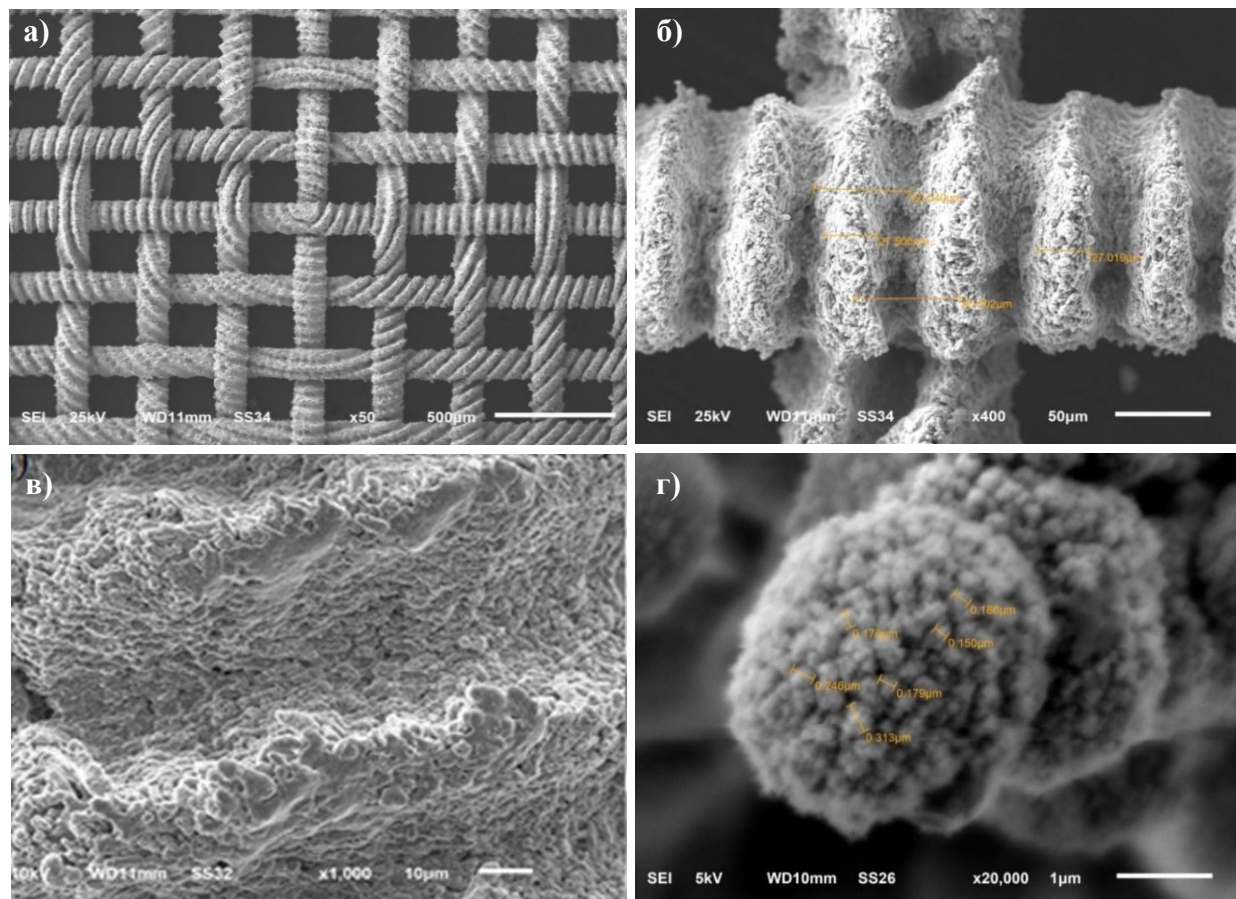
Для каждой отдельной микроструктуры в виде «гребня» получаем форм-фактор  $\beta_2$  (см.) 1:



$$\beta_2 \approx \frac{2}{1,5 \cdot 10^{-5} \ln(2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} / 1,5 \cdot 10^{-5})} \approx 2,5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}.$$

Откуда найдём величину локальной напряженности на вершине «гребня»  $E_{loc2} = \beta_2 U \approx 380 \text{ кВ/см}$ , а для коэффициента усиления поля, посчитав  $E_{loc1}$  в качестве  $E_0$ , получим  $E_{loc2} / E_{loc1} \approx 2,9$ .

Для микроструктур, которыми покрыты вершины «гребней», характерный радиус кривизны оценочно определён из РЭМ-сканов ( $\times 20000$ ) и имеет значения порядка  $R_3 \approx 2,5 \text{ мкм}$  (см. рис. 5, в, г). Соответственно расчёт даёт значение  $\beta_3$ , полученное из (2):  $1,15 \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ ,  $E_{loc3} \approx 1,7 \cdot 10^3 \text{ кВ/см}$ ,  $E_{loc3} / E_{loc2} \approx 4,5$ .



**Рис. 5.** Микро- и наноструктурирование сеточных латунных электродов после лазерного скрайбирования (размер ячейки 0,2 мм): а – общий вид скрайбированного центра сетки концентрическими проходами лазерного луча (увеличение  $\times 50$ ); б – РЭМ-изображение структурирования проволочек сетки ( $\times 400$ ); в – СЭМ-изображение микроструктур ( $\times 1000$ ); г – наноструктурирование микроструктур ( $\times 20000$ ) (РЭМ JEOL JSM 6610 Iv)

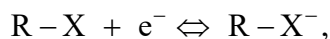
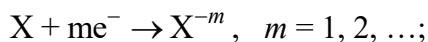
**Fig. 5.** Micro- and nanostructuring of mesh brass electrodes after laser scribing (cell size 0.2 mm): а – General view of the scribed center of the mesh with concentric laser beam passages ( $\times 50$  magnification); б – REM image of the structuring of the mesh wires ( $\times 400$ ); в – REM image of microstructures ( $\times 1000$ ); г – nanostructuring of microstructures ( $\times 20000$ ) (REM JEOL JSM 6610 Iv)

Перейдя к наноструктурам, которые обнаруживаются на поверхности микроструктур (см. рис. 5, г), рассмотренных последними, можем оценить характер-

ный радиус вершин этих наноструктур  $R_4 \approx 50 \text{ нм}$ . Тогда для форм-фактора усиления электрического поля отдельной наноструктурой имеем

$$\beta_4 \approx \frac{2}{5 \cdot 10^{-8} \ln(2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-8})} \approx \\ \approx 3,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}.$$

Окончательно для локального поля наноструктуры  $E_{\text{loc4}} = \beta_4 U \approx 5,5 \cdot 10^7 \text{ В/см}$ , усиление поля может достигать  $E_{\text{loc4}} / E_{\text{loc3}} \approx 32$ . Порядок степени для напряжённости показывает, что поля, возникающие на наноструктурах, создают возможность для автоэлектронной эмиссии электронов с вершин наноструктур в диэлектрическую жидкость, способствующей с эффектом Вина усилению катодно-электронной инжекции. Очевидно, что эмитировавшие с поверхности наноструктур катода электроны сразу захватываются молекулами жидкости, или примесными молекулами, превращающимися в ионы по схеме



где  $X$  – электроноакцептор либо функциональная группа электроотрицательного вещества;  $R$  – некоторый радикал.

Образующиеся при поляризации ионом прилегающих молекул жидкости сольваты осуществляют в итоге транспорт диэлектрической жидкости.

Проведённые выше оценки не учитывают ещё одного эффекта усиления зарядообразования – наличия двойных электрических полей на границе раздела сред [14], которые имеют нанометровые размеры и, с одной стороны, препятствуют разрядке ионов на поверхности, с другой – создают дополнительные локальные поля, помимо полей на вершинах структур, способствующие туннелированию электронов на межфазной границе электрод – жидкий диэлектрик. Нужно сказать, что сам двойной электрический слой подвижен и является функцией от напряжённости, и его влияние на инжекционные токи зависит от соотношения его текущих раз-

меров с размерами микро- и наноструктур.

## Выводы

Визуализацией электрического поля межэлектродного промежутка в Agros 2D для сеточных плоскопараллельных электродов ЭГД-преобразователя показано, что вплавление торцов проволок сеток в кольцевые держатели из плексигласа нивелируют краевые эффекты и позволяют в подобной конструкции электродов уменьшить поверхностные токи по стенкам цилиндрического рабочего канала ЭГД-преобразователя, а также уменьшить вероятность электрического пробоя.

Расчёты локальных электрических полей в программной среде Agros 2D, а также РЭМ-сканы поверхностей проволок сеточных электродов, подвергнутых модификации при лазерном скрайбировании, показывают, что уже при расстоянии между электродами 1,5 мм и разности потенциалов между электродами 1,5 кВ/см величина локальной напряжённости на вершине наноструктуры радиусом кривизны порядка 50 нм составляет  $5,5 \cdot 10^7 \text{ В/см}$ , а значение коэффициента усиления на наноструктурах достигает 32. Порядок степени локальной напряжённости говорит, что данные поля соответствуют холодной эмиссии электронов, способствующей усилению катодно-электронной инжекции.

Таким образом, расположением данных структур, как нано, так и микро, их геометрией можно контролировать инжекционный процесс и разрядку ионов на противозэлектродах, что способствует прокачиваемому, актуальному для сеток ЭГД-преобразователей эффекту. Более того, структурирование поверхности, например лазерным скрайбированием, которое создаёт микро- и наноструктурирование, позволяет регулировать образование либо положительных, либо отрицательных зарядов на катоде или на аноде.

**Список литературы**

1. Жакин А. И. О некоторых расчетных схемах ЭГД-насосов на основе редокс-систем // *Электронная обработка материалов*. 1988. № 3. С. 35–37.
2. Стишков Ю. К. Электрофизические процессы в жидкостях при воздействии сильных электрических полей. СПб.: Юстицинформ, 2019. 259 с.
3. Кожевников И. В. Теплообмен в замкнутых циркуляционных контурах под воздействием электрического поля: дис. ... канд. техн. наук. Кишинев, 1993. 207 р.
4. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований [пер. с англ.] / Дж. Уайтсайде, Д. Эйглер, Р. Андерс [и др.]; под ред. М. К. Роко, Р. С. Уильямса и П. Аливисатоса. М.: Мир, 2002. 292 с.
5. Структура и свойства твёрдых и сверхтвёрдых нанокompозитных покрытий / А. Д. Погребняк, А. П. Шпак, Н. А. Азаренков, В. М. Береснев // *Успехи физических наук*. 2009. Т. 179, № 1. С. 35–64.
6. Суздалев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 592 с.
7. Ролдугин В. И. Самоорганизация наночастиц на межфазных поверхностях // *Успехи химии*. 2004. Т. 73, № 2. С. 123–156.
8. Liu M., Yang Q., Wu S. Space charge injection behaviors and dielectric characteristics of nano - modified transformer oil using different surface condition electrodes // *AIP Adv.* 2019. Vol. 9 (3). P. 035319.
9. Effect of surface modification of electrodes on charge injection and dielectric characteristics of propylene carbonate / S. Wu, Q. Yang, T. Shao, Z. Zhang, L. Huang // *High Voltage*, 2020. Vol. 5 (1). P. 15–23.
10. Russel M., Selvaganapathy P., Ching C. Effect of electrode surface topology on charge injection characteristics in dielectric liquids: an experimental study // *J. Electrostat.* 2014. Vol. 72 (6). P. 487–492.
11. Кузько А. Е. Особенности изменения микрорельефа поверхностей электродов при электроконвекции в ПМС-50 // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия*. 2014. № 1. С. 24–30.
12. Кузько А. Е., Кузьменко А. П., Лазарев А. Н. Использование АСМ в расчёте инжекции зарядов при электроконвекции // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Физика и химия*. 2013. № 2. С. 32–37.
13. Opportunities of AFM in the description of charge formation from the nanostructured electrode at electroconvection / S. G. Emelyanov, A. E. Kuz'ko, A. V. Kuz'ko, A. P. Kuzmenko, D. I. Timakov // *Журнал нано- и электронной физики*. 2013. Т. 5, № 4. С. 4040.
14. Жакин А. И. Электрогидродинамика заряженных поверхностей // *Успехи физических наук*. 2013. Т. 183, № 2. С. 153–177.
15. Stability, thermo-physical and electrical properties of naphthenic/POME blended transformer oil nanofluids / R. Walvekar, D. A. Zairin, M. Khalid, P. Jagadish [et al.] // *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2021. Vol. 23. P. 100878.
16. Transformer oil based multi-walled carbon nanotube–hexylamine coolant with optimized electrical, thermal and rheological enhancements / A. Amiri, S. N. Kazi, M. Shanbedi [et al.] // *RSC Adv.* 2015. No. 130. P. 107222.
17. Beheshti A., Shanbed M., Heris S. Z. Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2014. Vol. 118, no. 3. P. 1451.

18. Барсук Е. С., Пожидаева В. В., Кузько А. Е. К разработке сеточных электродов с управляемой катодной инжекцией // Молодежь и системная модернизация страны: сборник научных статей 6-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых: в 5 т. Т. 3 / отв. ред. М. С. Разумов. Курск: Университетская книга. С. 208–211.
19. Кучинский Г. С., Назаров Н. И. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат, 1992. Т. 3. С. 320.
20. Афанасьев С. Б., Стишков Ю. К. ЭГД-устройства // Электрофизические процессы в жидкостях и газах. СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т, 2007. 87 с.
21. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 827 с.
22. Макарянц Г. М., Прокофьев А. Б. Основы метода конечных элементов. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. 80 с.
23. Kuz'menko A. P., Kuz'ko A. E., Timakov D. I. Effect of electric fields on the surface of nanostructured electrodes on charge formation // Technical Physics. Vol. 58, is. 2, 2013. P. 239–244.

## References

1. Zhakin A. I. O nekotorykh raschetnykh skhemakh EGD nasosov na osnove redoks-sistem [On some design schemes for EHD pumps based on redox systems]. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic processing of materials*, 1988, no. 3, pp. 35–37.
2. Stishkov Yu. K. Elektrofizicheskie protsessy v zhidkostyakh pri vozdествii sil'nykh elektricheskikh polei [Electrophysical processes in liquids under the influence of strong electric fields]. Moscow, Yustitsinform Publ., 2019. 262 p.
3. Kozhevnikov I. V. Teploobmen v zamknutykh tsirkulyatsionnykh konturakh pod vozdествiem elektricheskogo polya. Diss. kand. techn. nauk [Heat transfer in closed circulation circuits under the influence of an electric field]. Cand. eng. sci. dis. Kishinev, 1993. 207 p.
4. Whitesides J., Eigler D., Anders R., eds. Nanotekhnologiya v blizhaishem desyatiletii. Prognoz napravleniya issledovaniy [Nanotechnology in the next decade. Forecast of the direction of research]; ed. M. K. Roco, R. S. Williams, P. Alivisatos. Moscow, Mir Publ., 2002. 292 p.
5. Pogrebnyak A. D., Shpak A. P., Azarenkov N. A., Beresnev V. M. Struktura i svoystva tverdykh i sverkhtverdykh nanokompozitnykh pokrytii [Structure and properties of hard and superhard nano-composite coatings]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*, 2009, vol. 179, no. 1, pp. 35–64.
6. Suzdalev I. P. Nanotekhnologiya: fiziko-khimiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Nanotechnology: physical chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials]. Moscow, Book house "Libro-com", 2009. 592 p.
7. Roldugin V. I. Samoorganizatsiya nanochastits na mezhfaznykh poverkhnostyakh [Self-organization of nanoparticles on interfacial surfaces]. *Uspekhi khimii = Advances in chemistry*, 2004, vol. 73, no. 2 pp. 123–156.
8. Liu M., Yang Q., Wu S. Space charge injection behaviors and dielectric characteristics of nano-modified transformer oil using different surface condition electrodes. *AIP Adv.*, 2019, no. 9 (3), pp. 035319.
9. Wu S., Yang Q., Shao T., Zhang Z., Huang L. Effect of surface modification of electrodes on charge injection and dielectric characteristics of propylene carbonate. *High Voltage*, 2020, vol. 5 (1), pp. 15–23.

10. Russel M., Selvaganapathy P., Ching C. Effect of electrode surface topology on charge injection characteristics in dielectric liquids: an experimental study. *J. Electrostat.*, 2014, vol. 72, (6), pp. 487–492.
11. Kuzko A. E. Osobennosti izmeneniya mikrorel'efa poverkhnosti elektrodov pri elektrokonveksii v PMS-50 [Peculiarities of changes in the microrelief of electrode surfaces during electroconvection in PMS-50]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i khimiya = Proceedings of the Southwest State University. Series: Physics and Chemistry*, 2014, no. 1, pp. 24–30.
12. Kuzko A. E., Kuzmenko A. P., Lazarev A. N. Ispol'zovanie ASM v raschete inzhetskii zaryadov pri elektrokonveksii [The use of AFM in the calculation of charge injection during electroconvection]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika i khimiya = Proceedings of the Southwest State University. Series: Physics and Chemistry*, 2013, no. 2, pp. 32–37.
13. Emelyanov S. G., Kuz'ko A. E., Kuz'ko A. V., Kuzmenko A. P., Timakov D. I. Opportunities of AFM in the description of charge formation from the nanostructured electrode at electroconvection [Opportunities of AFM in the description of charge formation from the nanostructured electrode at electroconvection]. *Zhurnal nano- i elektronnoi fiziki = Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2013, vol. 5, is. 4, pp. 4040.
14. Zhakin A. I. Elektrogidrodinamika zaryazhennykh poverkhnosti [Electrohydrodynamics of charged surfaces]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*, 2013, vol. 183, no. 2, pp. 153–177.
15. Walvekar R., Zairin, D. A., Khalid M., Jagadish P., eds. Stability, thermo-physical and electrical properties of naphthenic/POME blended transformer oil nanofluids. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2021, vol. 23, pp. 100878.
16. Amiri A., Kazi S. N., Shanbedi M., eds. Transformer oil based multi-walled carbon nanotube–hexylamine coolant with optimized electrical, thermal and rheological enhancements. *RSC Adv.*, 2015, no. 130, p. 107222.
17. Beheshti A., Shanbedi M., Heris S. Z. Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid. *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2014, vol. 118, no. 3, p. 1451.
18. Barsuk E. S., Pozhidaeva V. V., Kuzko A. E. [Development of grid electrodes with controlled cathode injection]. *Molodezh' i sistemnaya modernizatsiya strany. Sbornik nauchnykh statei 6-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Youth and system modernization of the country. Collection of scientific articles of the 6th International Scientific Conference of Students and Young Scientists]; ed. by M. S. Razumov. Kurks, Universitetskaya kniga Publ., 2021, vol. 3, pp. 208–211. (In Russ.)
19. Kuchinsky G. S., Nazarov N. I. Silovye elektricheskie kondensatory [Power electric capacitors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992, vol. 3, pp. 320.
20. Afanasiev S. B., Stishkov Yu. K. EGD-ustroistva [EHD devices]. *Elektrofizicheskie protsessy v zhidkostyakh i gazakh* [Electrophysical processes in liquids and gases]. St.-Petersburg, St.-Petersburg St. Univ. Publ., 2007. 87 p.
21. Vargaftik N. B. Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti [Reference book on thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 827 p.
22. Makaryants G. M., Prokofiev A. B. Osnovy metoda konechnykh elementov [Fundamentals of the finite element method]. Samara, Samara St. Aerospace Univ., 2013. 80 p.
23. Kuz'menko A. P., Kuz'ko A. E., Timakov D. I. Effect of electric fields on the surface of nanostructured electrodes on charge formation. *Technical Physics*, vol. 58, is. 2, 2013, pp. 239–244.



---

**Информация об авторах / Information about the Authors**

**Кузько Андрей Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4202-277X, Researcher ID: 7801324495

**Andrey E. Kuzko**, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4202-277X, Researcher ID: 7801324495

**Жакин Анатолий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

**Anatoly I. Zhakin**, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

**Кузько Анна Витальевна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: avkuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9966-9625, Researcher ID: 55975380100

**Anna V. Kuzko**, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: avkuzko@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9966-9625, Researcher ID: 55975380100

**Игнатенко Николай Михайлович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: inmkstu@bk.ru, ORCID: 0000-0002-2807-9887

**Ignatenko Nikolay M.**, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: inmkstu@bk.ru, ORCID: 0000-0002-2807-9887

**Барсук Елизавета Сергеевна**, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: barsuk\_l@mail.ru

**Elizaveta S. Barsuk**, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: barsuk\_l@mail.ru

**Зубарева Мария Олеговна**, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mari.zubareva13@mail.ru

**Maria O. Zubareva**, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mari.zubareva13@mail.ru

**Бондарев Михаил Алексеевич**, студент, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: misha.bondarev.2003@mail.ru

**Mikhail A. Bondarev**, Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: misha.bondarev.2003@mail.ru