

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-50-63>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

## **Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер**

### **Часть 2**

**Т. В. Рыжова<sup>1)</sup>, Д. Д. Тумаркина<sup>2)</sup>, Д. Н. Бухаров<sup>2)</sup>, В. Д. Самышкин<sup>2)</sup>,  
А. Ф. Лелекова<sup>2)</sup>, М. М. Аракелян<sup>3)</sup>, А. О. Кучерик<sup>2)</sup>, С. М. Аракелян<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Российская Федерация),

<sup>3)</sup>Ереванский государственный университет (Ереван, Республика Армения)

**Реферат.** Во второй части статьи проведено исследование и моделирование электрофизических характеристик деталей разного назначения с определенной лазерно-индуцированной конфигурацией микро- и наноструктурных особенностей на поверхности изделия. Актуальность данного рассмотрения связана с тем, что при функционировании любой энергетической установки неотъемлемой ее частью являются значения ее электрофизических характеристик. Проведенные исследования позволяют управлять ими как в подводящей платформе собственно электропитания от соответствующих генераторов для установки, так и в отводящей от нее энергии для обеспечения работы соответствующих блоков, электропитание которых осуществляется энергоустановками разного класса при их функционировании в требуемых режимах, включая и экстремальные динамические режимы эксплуатации. В исследовании речь идет конкретно о демонстрационных схемах с прототипами систем с использованием микросвитков 1D-структур диоксида титана в металлоуглеродных соединениях (углерод – золото) в условиях цепочного C–Au легирования. При этом была реализована трехэтапная схема с использованием лазерной абляции из титановой мишени с синтезом тонкой пористой пленки диоксида титана и ее осаждением на демонстрационную подложку из кварцевого стекла. Далее производился ввод линейных цепочек углерода, стабилизированных наночастицами золота по краям линейных цепочек, в матрицу пористой пленки диоксида титана струйным распылением и реализовывалось формирование массива микросвитков, получаемого с помощью механического воздействия. Проведено математическое и компьютерное моделирование топологических микро- и наноструктур на поверхности металлических комплексов с управляемыми при лазерном воздействии конфигурациями. Выполненный анализ позволяет сделать вывод, на основе предложенных

---

#### **Адрес для переписки**

Рыжова Татьяна Викторовна  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Партизанский, 77,  
220107, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 250-36-95  
[ryzhovatv@bntu.by](mailto:ryzhovatv@bntu.by)

---

#### **Address for correspondence**

Ryzhova Tatiana V.  
Belarusian National Technical University  
77, Partizansky Ave.,  
220107, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 250-36-95  
[ryzhovatv@bntu.by](mailto:ryzhovatv@bntu.by)

---

процедур с процессами регулирования топологической структурой для рассмотренных поверхностных объектов при их лазерном синтезе, о перспективности данного направления, что связано с возможностью управления функциональными поверхностными характеристиками в требуемом направлении, в частности по их электрофизическим параметрам для различных изделий, в устройствах, используемых в энергетике.

**Ключевые слова:** электрофизика устройств систем энергетики, управляемые поверхностные характеристики при лазерном воздействии, металлоуглеродные комплексы, C–Au цепочечные структуры, микросвитки TiO<sub>2</sub>, регулируемые теплофизические и электрофизические динамические процессы

**Для цитирования:** Технологии улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер. Ч. 2 / Т. В. Рыжова [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2026. Т. 69, № 1. С. 50–63. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-50-63>

## Technologies for Improving the Operational Characteristics of Dynamic Gas-Liquid Thermal Power Plants with Controlled Laser Induction of Adjustable Local Configurations of Topological Micro- and Nanostructures on the Internal Metal Surface of Working Chambers

### Part 2

T. V. Ryzhova<sup>1)</sup>, D. D. Tumarkina<sup>2)</sup>, D. N. Bukharov<sup>2)</sup>, V. D. Samishkin<sup>2)</sup>, A. F. Lelekova<sup>2)</sup>, M. M. Arakelyan<sup>3)</sup>, A. O. Kucherik<sup>2)</sup>, S. M. Arakelyan<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs (Vladimir, Russian Federation),

<sup>3)</sup>Yerevan State University (Yerevan, Republic of Armenia)

**Abstract.** The second part of the article presents a study and modeling of the electrophysical characteristics of parts with various purposes featuring a specific laser-induced configuration of micro- and nanostructural surface features on the product. The relevance of this study is due to the fact that during the operation of any power plant, the values of its electrophysical characteristics are an integral part of it. The conducted research enables control over these characteristics both in the input platform for power supply from corresponding generators to the installation and in the output energy used to ensure the operation of respective units, whose power supply is provided by energy installations of different classes during their operation in required modes, including extreme dynamic operating modes. This study specifically addresses demonstration circuits with prototypes of systems using microscrolls of 1D titanium dioxide structures in metal-carbon compounds (carbon – gold) under C–Au chain doping conditions. In this case, a three-stage process was implemented using laser ablation from a titanium target, synthesizing a thin porous titanium dioxide film and depositing it onto a demonstration quartz glass substrate. Subsequently, linear carbon chains, stabilized by gold nanoparticles at their edges, were introduced into the porous titanium dioxide film matrix by jet spraying, forming an array of microscrolls through mechanical action. Mathematical and computer modeling of topological micro- and nanostructures on the surfaces of metal complexes with laser-controlled configurations was performed. The conducted analysis allows us to draw a conclusion, based on the proposed procedures and processes regulating the topological structure of the considered surface objects during their laser synthesis, about the prospects of this direction, which is associated with the possibility

of controlling the functional surface characteristics in the required direction, particularly regarding their electrophysical parameters for various products used in energy devices.

**Keywords:** electrophysics of energy system devices, laser-controlled surface characteristics, metal-carbon complexes, C-Au chain structures, TiO<sub>2</sub> microscrolls, regulated thermophysical and electrophysical dynamic processes

**For citation:** Ryzhova T. V., Tumarkina D. D., Bukharov D. N., Samishkin V. D., Lelekova A. F., Arakelyan M. M., Kucherik A. O., Arakelyan S. M. (2026) Technologies for Improving the Operational Characteristics of Dynamic Gas-Liquid Thermal Power Plants with Controlled Laser Induction of Adjustable Local Configurations of Topological Micro- and Nanostructures on the Internal Metal Surface of Working Chambers. Part 2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 69 (1), 50–63. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-69-1-50-63> (in Russian)

### Введение

Во второй части статьи представлено дальнейшее развитие исследований по топологическим микро- и наноструктурам на поверхности металлических комплексов с управляемыми при лазерном воздействии функциональными характеристиками и их моделированию на основе фрактального подхода, изложенного, в частности, в работах [1, 2].

Акцент сделан на рассмотрении топологических микросвитков диоксида титана с углеродно-золотым C–Au цепочным легированием, в частности при проведении моделирования структурных особенностей и управления электрофизическими характеристиками. При этом реализованы модели кластерных структур и цепочечных конфигураций для неоднородных объектов с разной топологией. Отдельно изучена электрофизика кластерных топологических структур с разной концентрацией атомов золота. В финале статьи кратко обсуждаются вопросы возможности разработки элементов и систем различного предназначения, включая электротехнику, микро- и нанoeлектронику и фотонику, на новых физических принципах как перспективное направление развития в самое ближайшее время сектора высокотехнологичных инновационных разработок, конкурентных на мировом уровне.

### Топологические микросвитки диоксида титана с углеродно-золотым легированием – моделирование структурных особенностей и электрофизических характеристик

**Кластерные структуры и модели для неоднородных объектов с разной топологией.** Рассмотрим один из примеров другого класса неоднородных структур, которые являются весьма перспективными для различных приложений. Речь идет о микроструктурах диоксида титана, которые находят широкое применение в качестве инновационной элементной базы для электрофизики [3]. Так, образцы микросвитков диоксида титана с добавлением наночастиц металлов могут применяться как значимая альтернатива при разработке солнечных элементов [4]. Формирование таких кластерного типа объектов становится возможным благодаря наличию на их поверхности множества дефектов, которые способствуют усилению, в частности, электропроводимости, которая обсуждалась в [5]. Кроме того, в данной структуре этого материала наблюдается появление достаточно значительного фототока в случае облучения ее поверхности светом [6].

Экспериментально существует достаточно большое число методов получения систем микросвитков диоксида титана [7–9]. Одним из простых и удобных методов является трехэтапная схема [10], которая и использовалась нами.

На первом этапе методом лазерной абляции из титановой мишени синтезировалась тонкая пористая пленка диоксида титана. Она осаждалась на подложку из ИТО-стекла. Синтез пленки реализовывался на лазерной установке LDesigner F1. Мощность лазерного излучения составляла величину 10 Вт. Лазерное воздействие производилось на длине волны 1,06 мкм в импульсном режиме. Частота следования импульсов составляла 20 кГц, их длительность 100 нс. Использовался режим сканирования рабочей области облучения лазерным пучком диаметром 30 мкм со скоростью 15 мм/с. Время воздействия составляло 9 мин. На втором этапе методом струйного распыления (Spraying-Jet) в матрицу пористой пленки диоксида титана производилось распыление стабилизированных наночастицами золота по краям линейных цепочек углерода [11]. Это позволило улучшить оптические и электронные свойства данной пористой пленки. На третьем этапе из полученной пористой пленки формировался массив микросвитков, получаемый с помощью механического воздействия движущегося лезвия по заданной траектории методом лезвийной резки (blading-методом) [12].

Таким образом, были синтезированы образцы микросвитков диоксида титана с упорядоченной структурой и варьирующей степенью разветвления элементов. Исследование РЭМ-изображений таких образцов, полученных с помощью микроскопа Quanta 200 3D, показало, что микросвитки, образующие массивы, обладают разветвленной дендритной структурой (рис. 1, масштаб указан на рисунках).

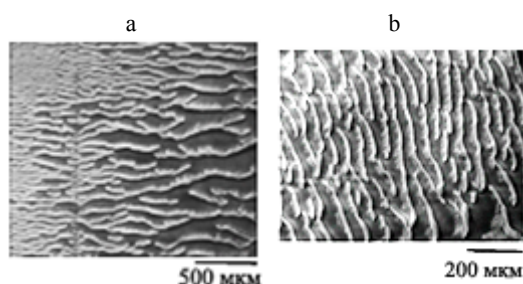


Рис. 1. РЭМ-изображение массива микросвитков с дендритной структурой в случае их формирования при расстоянии между микролезвием и поверхностью пленки порядка:

а – 10 мкм (указан масштаб 500 мкм); б – 15 мкм (указан масштаб 200 мкм)

Fig. 1. SEM-image of an array of microscrolls with a dendritic structure in the case of their formation at a distance between the microblade and the film surface of the order of:  
a – 10 μm (the scale is 500 μm); b – 15 μm (the scale is 200 μm)

При этом оценивалась их фрактальная размерность. Процедура расчета с соответствующими ссылками на литературу приведена в первой части статьи, в данной части мы только кратко перечисляем базовые пункты.

При этом, например, для образца из рис. 1а оценка фрактальной размерности с использованием метода подсчета ячеек (boxcounting), реализованного в среде MATLAB 7, составила значение 1,74, что позволило достаточно четко отнести рассматриваемую систему к дендритной структуре.

Средний диаметр микросвитков в системе из рис. 1а варьировался около значения 9 мкм, а расстояния между элементами находились в диапазоне от 32 до 137 мкм с допуском порядка 10 %. На рис. 1б значение среднего диаметра микросвитка составило величину порядка 16 мкм.

Таким образом, можно утверждать, что диаметр микросвитков, а также их высота составляли величины порядка расстояния между подложкой микрорезвием, используемым при формировании микросвитков.

Применение возможностей имитационного моделирования позволяет описать наблюдаемые геометрические особенности этих структур, оказывающие влияние на функциональные характеристики полученных образцов.

Для описания таких структурных особенностей в полученных образах применялся подход феноменологического имитационного моделирования, когда исследуемое явление представлялось в общем виде [13], а модель подбиралась на основе сходства модели и реального моделируемого объекта [14].

Для описания торцевого сечения микросвитка использовалось уравнение спирали Архимеда [15]:

$$x = \Theta_t^2 \cos(\Theta_t); \quad y = \Theta_t^2 \sin(\Theta_t),$$

где  $\Theta_t$  – текущий угол поворота.

Для задания шероховатости и неоднородности для полученной структуры применяли диффузионное приближение, основанное на решении уравнения Лапласа при постоянном коэффициенте диффузии  $d$ :

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = d \left( \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial y^2} \right),$$

где  $\partial u(x, y, t)$  – концентрация вещества в точке декартова пространства с координатами  $x, y$  в момент времени  $t$  в дискретной области с наложенной равномерной сеткой.

Уравнение диффузии в дискретном виде решалось с использованием дискретного клеточного автомата (КА). Он формировался из набора правил, которые определяли, как на каждую ячейку повлияют некоторые соседние ячейки расчетной области, называемые окрестностью соседства. Текущая ячейка являлась соседом другой, если у нее была возможность прямо воздействовать на другую ячейку согласно заданному правилу за один шаг, что обсуждалось в первой части данной статьи.

В принципе, правило КА могло бы использовать любое число соседей. Однако соображения эффективности диктуют практический предел числа

и длины прямых связей соседей. В частности, для формирования двумерных КА одной из наиболее популярных окрестностей является окрестность Неймана с ближайшими четырьмя соседями для каждой ячейки. Тогда правило функционирования КА таково, что на каждой итерации выбирается случайная ячейка, которая меняется своим значением равновероятно с одним из своих соседей.

Структурные неоднородности генерировались итерационно, начиная от стартовой фигуры. Множество состояний ячеек расчетной области формировалось из двух возможностей: 1 – ячейка занята, 0 – ячейка свободна. Правило КА задавалось следующим образом: если рассматриваемая ячейка свободна и одна из ее соседей в рамках окрестности соседства Неймана занята, то с заданной вероятностью  $p$  она становилась занятой. Схема разнотных итераций КА со стартовой структурой в виде квадрата в центре дается на соответствующем изображении при проведении анализа.

Основным параметром модели являлась вероятность  $p$  ячейки быть занятой, которая соответствовала нормированному коэффициенту диффузии. Данная модель в рамках КА позволяет задавать тип образующих структуру частиц. Это дает возможность вводить в структуру микросвитков примесные атомы, например золотые наночастицы, что принципиально для различных приложений.

В нашем случае частица, маркированная значением 1, определялась как диоксид титана, частица с маркировкой 2 – золотая наночастица. Тип модельной частицы устанавливался с заданной вероятностью, определяемой в соответствии с концентрацией золотых частиц в системе  $p_g$ . Тогда вероятность частицы быть из состава диоксида титана определялась как разность  $p_{tio} = 1 - p_g$ .

Для описания вида сверху массива микросвитков применялась процедура в рамках универсальной диффузионной модели, позволяющей генерировать дендритные структуры. Модельное приближение рассматривалось в рамках подхода диффузионно-ограниченной агрегации (DLA), реализованной в ходе итерационного процесса. Инициализация модели заключалась в размещении стартовой структуры на нижней границе расчетной области. В начале каждой итерации в расчетную область вводилась одна модельная частица.

Эта частица совершала случайное блуждание по направлению к нижней границе расчетной области – двигалась вниз, влево или вправо на одну ячейку за один шаг блуждания. Формирование модельной структуры реализовывалось в рамках КА с окрестностью Неймана по следующему правилу: если в одной из четырех клеток окрестности соседства во время смещения частицы появлялась занятая ячейка, то с заданной вероятностью  $s$  производилась агрегация с ней. Как только частица агрегировала, то текущая итерация заканчивалась.

На вертикальных границах расчетной области реализовывались периодические граничные условия, заключающиеся в отражении от них модель-

ной частицы при ее движении. На нижней границе реализовывалось условие агрегации, когда текущая частица на ней фиксировалась и становилась зародышевой структурой для формирования нового модельного микросвитка.

Варьирование основных имитационных параметров модели осуществлялось с помощью следующих двух показателей: вероятности агрегации частиц и вероятности их единичных случайных смещений. Это позволяет сгенерировать модели различной структуры из таких объектов, а также задавать преимущественное направление роста этих структур.

Описанные выше модели были реализованы в среде MATLAB на квадратной расчетной области в относительных единицах. На рис. 2 приведена модель торцевого сечения микросвитка с шероховатой поверхностью, соответствующая пористой структуре исходной поверхности системы. Модели торцевого сечения микросвитка с шероховатой поверхностью могут учитываться при рассмотрении электрофизических и оптических свойств, обусловленных особенностями геометрии объекта. Из рис. 2 можно оценить влияние модельного нормированного коэффициента диффузии  $p$ . Так, при одинаковом количестве итераций для более высоких значений  $p$  толщина стенок генерируемой структуры становится соответственно больше. На рис. 2а приведена модель торцевого сечения при  $p = 0,05$ , на рис. 2б – при  $p = 0,01$ . Кроме этого, на рис. 2с приведен случай учета концентрации Au-наночастиц.

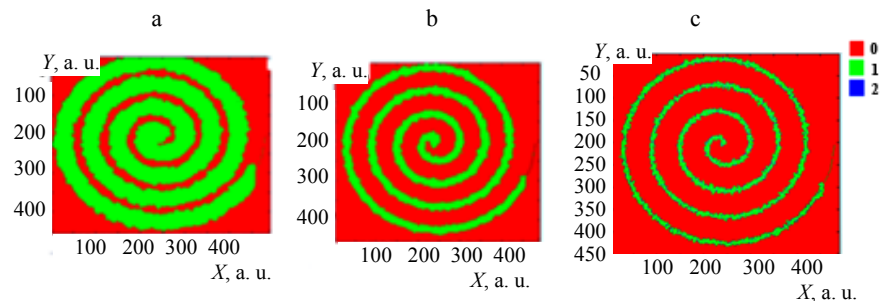


Рис. 2. Модели торцевого сечения микросвитка при: а –  $p = 0,05$ ; б –  $0,01$ .

Для случая учета типа модельной частицы изображения отмечено цветом:

0 – подложка, 1 – диоксид титана, 2 – золото (с) (см. ниже рис. 3)

Fig. 2. Models of the end section of the microscroll at: а –  $p = 0.05$ ; б –  $0.01$ .

In case of taking into account the type of model particle, the images are marked with color:

0 – substrate, 1 – titanium dioxide, 2 – gold (c) (see below Fig. 3)

Переход к абсолютным единицам позволяет выполнить сравнение модели с реальной структурой. Для рис. 2 масштабный коэффициент можно положить равным  $1,1 \text{ мкм}$ , тогда абсолютный расчетный диаметр будет порядка  $10 \text{ мкм}$ . По такому алгоритму расчетные диаметры будут согласованы со средним значением для измеренных в эксперименте образцов.

На рис. 3 приведены модели вида сверху для микросвитков в приближении DLA при различной концентрации золотых наночастиц (с) в относи-

тельных единицах. Синим цветом на рис. 3 отмечены модельные частицы из золота. Рис. 3а получен при концентрации золотых частиц  $c = 20\%$ , рис. 3б – при  $c = 70\%$ .

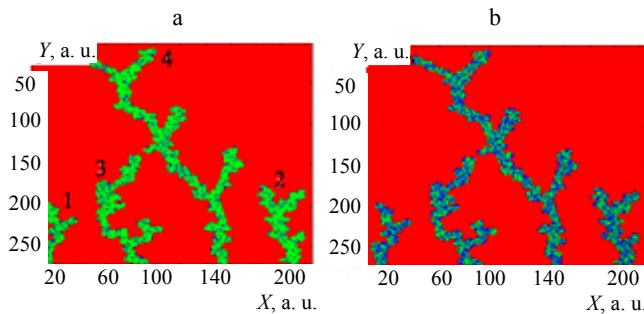


Рис. 3. DLA модель системы микросвитков при: а –  $c = 20\%$ , б –  $70\%$

Fig. 3. DLA model of the micro scrolls system at: а –  $c = 20\%$ , б –  $70\%$

Основной параметр модели – вероятность агрегации ( $s$ ) оказывает влияние на модельную структуру. Его высокие значения позволяют генерировать более разветвленные структуры. В случае низких значений структура микросвитка стремится к типу линейного объекта. Так, на рис. 3 аналогичные фрагменты изображения фигур с обозначением (показано только на рис. 3а) цифрами 1, 2 получены при  $s = 0,3$ , фрагмент 3 – при  $s = 0,6$ , фрагмент 4 – при  $s = 0,8$ .

Расчетная фрактальная размерность модельного массива структур по изображению на рис. 3а составляет величину 1,77. Кроме того, в модели учитывалась концентрация наночастиц золота как одного из основных параметров, оказывающих влияние на функциональные характеристики (например, электропроводимость) образца.

Разница фрактальных размерностей модельной структуры и реального полученного в эксперименте образца не превосходит величину 0,02, что свидетельствует об относительной погрешности моделирования порядка 1 %.

Аналогичный переход к абсолютным единицам позволил сравнить длины модельных структур и образцов, полученных в эксперименте. Например, для рис. 3а, положив масштабный коэффициент равным среднему диаметру микросвитков 9 мкм, получим абсолютные длины модельных образцов, не превосходящие 2,25 мм и согласующиеся с максимальным значением для измеренных реальных образцов.

Таким образом, реализованное соответствие фрактальных размерностей, а также размеров (длин) моделей структур с измеренными величинами позволяет ожидать также и соответствия значений для расчетных и измеренных функциональных характеристик (например, электрофизических или оптических), обусловленных размерными структурными эффектами.

**Электрофизика кластерных цепочечных топологических структур с разной концентрацией атомов золота.** Покажем, каким образом имен-

но электрофизические характеристики зависят от концентрации наночастиц металла (золота, в нашем случае) в подобных линейчатых структурах.

Электрические свойства металлоуглеродных цепочечных структур на плоской поверхности рассчитываются на основе собственного сопротивления сегментов цепочки  $R_{int}$  и контактного сопротивления между цепочками  $R_c$  [16]

$$R = R_{int} + R_c.$$

Внутреннее сопротивление на плоскости (в горизонтальном направлении при рассмотрении в общем случае 3D структуры) между двумя соседними точками в цепочке (ее по аналогии с углеродными нанотрубками будем отмечать индексом CNT) может быть оценено в виде

$$R_{int} = \frac{4L}{\pi(\sigma_{CNT} + \delta_{metal}\sigma_{metal})D_{CNT}^2},$$

где  $L$  – средняя длина цепочки;  $\delta_{metal}$  – средняя концентрация наночастиц металла в цепочке;  $D_{CNT}$  – диаметр наночастицы;  $\sigma_{CNT}$  – собственная электропроводимость цепочки;  $\sigma_{metal}$  – то же металлических частиц соответственно.

Другой компонент сопротивления – контактное сопротивление  $R_c$  между двумя рассматриваемыми цепочками (здесь можно говорить о туннельном эффекте с прыжковым механизмом электропроводимости для зарядовых носителей) определяется по соотношению Ландауэра – Бюттикера (LB) [17]

$$R_c \approx \frac{h}{2e^2MT},$$

где  $e$  – заряд электрона;  $h$  – постоянная Планка;  $M$  – номер контактного канала;  $T$  – вероятность передачи зарядового носителя (электрона), которая может быть рассчитана в виде [18]:

$$T = \exp\left(\frac{-d_{vdw}}{h / \sqrt{8m_e} |w_{metal} - w_{CNT}|}\right) \text{ при } 0 \leq d \leq D_{CNT} + D_{metal} + 2d_{vdw},$$

где  $m_e$  – масса электрона;  $d$  – расстояние между осями двух цепочечных объектов (нанотрубок);  $w_{metal}$ ,  $w_{CNT}$  – работы выхода зарядов из металлических наночастиц и нанотрубок соответственно;  $d_{vdw}$  – Ван-дер-Ваальсово расстояние [19].

Результаты экспериментальных измерений приведены на рис. 4 для двух использованных схем измерения.

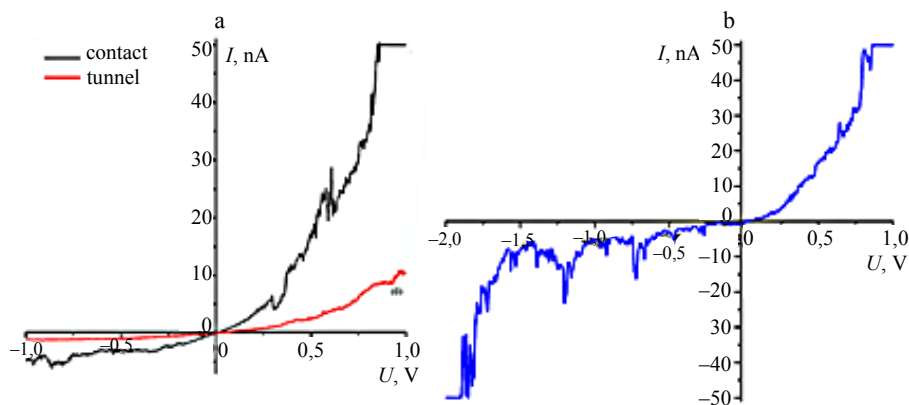


Рис. 4. Измеренные зависимости для вольт-амперных характеристик (ВАХ):

ВАХ – зависимость для двух использованных схем измерения;

а – контактная и туннельная; б – туннельная ВАХ при изменении полярности напряжения на подводимых микроконтактах к образцу

Fig. 4. Measured dependencies for the Volt-Ampere Characteristics (VAC):

VAC – dependence for two used measurement schemes: a – contact and tunnel;

b – tunnel VAC when changing the voltage polarity on the microcontacts applied to the sample

Расчеты проводились нами для значений:  $L = 20$  мкм;  $D_{CNT} = 10$  мкм;  $\sigma_{metal} = 4,16 \cdot 10^7$  С/м;  $d_{vdw} = 170 \cdot 10^{-12}$  м;  $w_{metal} = 5,1$  эВ;  $w_{CNT} = 4,7$  эВ с варьированием значений  $\delta_{metal}$ . При этом при моделировании туннельного механизма электропроводимости анализировалась зависимость как для положительных, так и отрицательных значений областей прикладываемых электронапряжений (ср. с рис. 4б).

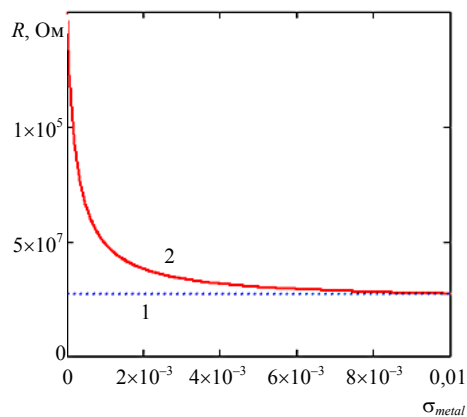


Рис. 5. Зависимость среднего электросопротивления (вертикальная ось) от концентрации металлических наночастиц (золота) в цепочке (указана на горизонтальной оси в долях):

1 – измеренное значение; 2 – модельные данные

Fig. 5. Dependence of the average electrical resistance (vertical axis) on the concentration of metal nanoparticles (gold) in the chain (indicated on the horizontal axis in fractions):

1 – measured value; 2 – model data

Оценка среднего значения электросопротивления (рис. 5) на основе данных из рис. 4b составила величину  $2,7 \cdot 10^7$  Ом для концентрации наночастиц золота в цепочке  $\delta_{metal} \leq 50$  %, но наиболее точные расчетные результаты с погрешностью порядка 10 % достигались в случае, не превосходящем 1,39 %.

Таким образом, приведенные выше соотношения позволяют формировать модели электропроводимости цепочечных структур. При этом уже малое значение концентрации наночастиц золота в таких структурах достаточно для управления электрофизическими характеристиками образцов. Это является принципиальной возможностью для регулирования электрофизики с требуемыми значениями параметров подобных объектов для различных приложений.

### ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены вопросы и модели синтеза поверхностных микро- и наноструктур определенной конфигурации на примере дендритных структур и дефектов с управляемой топологией при лазерной абляции с поверхности металлических комплексов в условиях определенных режимов лазерного воздействия. Подобные технологии представляют значительный интерес при лазерной обработке деталей энергетических установок, в частности для управления в их периферийных блоках обеспечения функционирования установок с соответствующими электрофизическими характеристиками требуемого значения.

2. Приведены результаты экспериментального синтеза системы микросвитков диоксида титана с атомами золота в виде ассоциированных Au-наночастиц, полученных оригинальным трехэтапным методом синтеза. Выполнена оценка пространственных размеров и фрактальных размерностей данных цепочечных структур в таких образцах в рамках имитационной модели в приближении хорошо известных подходов математического и компьютерного моделирования клеточного автомата и диффузионно-ограниченной агрегации в окрестности Неймана. По данной процедуре проанализирована модель торцевого сечения микросвитка в приближении спирали Архимеда с учетом шероховатости поверхности образца. Полученные величины погрешности моделирования в сравнении с экспериментальными данными показали адекватную применимость предложенных моделей для описания систем микросвитков. Проведены эксперименты по электрофизике подобных кластерных топологических структур с разной концентрацией атомов золота в таких цепочных объектах.

3. Рассмотренные объекты с управляемой микро- и нанотопологией при их лазерном синтезе на поверхности материала представляют значительный интерес для различных приложений в аспекте регулирования в заданном направлении функциональными/электрофизическими характеристиками таких структур. Это должно позволить разрабатывать элементы

и системы различного предназначения, включая электротехнику, микро- и наноэлектронику и фотонику, на новых физических принципах, в том числе для энергетических установок – прототипов различных устройств с требуемыми электрофизическими характеристиками.

4. Проведенные исследования демонстрируют универсальность данного подхода поверхностной инженерии для различных материалов с легирующими химическими элементами и комплексами практически любого состава, включая синтез тонких пленок металлоуглеродных и алмазоподобных соединений широкого класса. Такие структуры относительно легко формируются с помощью лазерной абляции на ответственных деталях теплоэнергетических генераторов разной конструкции с оптимизацией их функциональных характеристик в заданном направлении, которое получит свое развитие в самое ближайшее время как сектор высокотехнологичных инновационных разработок, конкурентных на мировом уровне, в том числе и в сфере энергетики.

Работа выполнена в рамках Государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0019, Госзадание ВлГУ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации / Т. В. Рыжова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172>.
2. Самопроизвольное зарастание трещиноватости в рабочих камерах энергетических газожидкостных тепловых установок – диффузионные динамические процессы / Т. В. Рыжова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 4. С. 345–362. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-345-362>.
3. Нанотрубки диоксида титана: синтез, структура, свойства и применение / А. А. Ремпель, А. А. Валеева, А. С. Вохминцев, И. А. Вайнштейн // Успехи химии. 2021. Т. 90, № 11. С. 1397–1414. <https://doi.org/10.1070/RCR4991>.
4. Advancements in Black Titanium Dioxide Nanomaterials for Solar Cells: a Comprehensive Review/ T. C. Selema, T. D. Malevu, M. R. Mhlango [et al.] // Emergent Materials. 2024. Vol. 7, No 6. P. 2163–2188. <http://doi.org/10.1007/s42247-024-00731-z>.
5. Effect of Defects On Photocatalytic Activity of Rutile TiO<sub>2</sub> Nanorods / Z. Zhao, X. Zhang, G. Zhang [et al.] // Nano Research. 2015. Vol. 8, No 12. P. 4061–4071. <https://doi.org/10.1007/s12274-015-0917-5>.
6. Barlow, Z. Surface and Defect Engineered Polar Titanium Dioxide Nanotubes as an Effective Polysulfide Host for High-Performance Li–S Batteries / Z. Barlow, Z. Wei, R. Wang // Materials Chemistry and Physics. 2023. Vol. 309. P. 128316. <http://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128316>.
7. One-Step Hydrothermal Synthesis of Anatase TiO<sub>2</sub> Nanotubes for Efficient Photocatalytic CO<sub>2</sub> Reduction / K. Alkanad, A. Hezam, N. Al-Zaqri [et al.] // ACS Omega. 2022. Vol. 7, No 43. P. 38686–38699. <http://doi.org/10.1021/acsomega.2c04211>.
8. Handbook of Sol-Gel Science and Technology / eds: L. Klein, M. Aparicio, A. Jitianu. 2<sup>nd</sup> ed. Cham, Switzerland: Springer, 2018. 3828 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32101-1>.
9. A Review on TiO<sub>2</sub>-based Nanotubes Synthesized Via Hydrothermal Method: Formation Mechanism, Structure Modification, and Photocatalytic Applications / N. Liu, X. Chen,

- J. Zhang, J. W. Schwank // *Catalysis Today*. 2014. Vol. 225. P. 34–51. <http://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.10.090>.
10. Titanium-Based Metasurfaces for Optoelectronics / S. Kavokina, V. Samyshkin, J. Cao [et al.] // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 14, No 1. Art. 56. <http://doi.org/10.3390/nano14010056>.
11. Electric Field Assisted Alignment of Monoatomic Carbon Chains/ S. Kutrovskaya, I. Chestnov, A. Osipov [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, No 1. Art. 9709. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65356-8>.
12. Агафонова, Н. А. Математические основы феноменологического метода построения аналитических моделей теплоэнергетических объектов управления / Н. А. Агафонова // *Вестник ИГЭУ*. 2007. № 4. С. 69–71.
13. Левина, А. П. Обзор метода имитационного моделирования / А. П. Левина // *Современная техника и технологии*. 2017. № 5 URL: <https://technology.snauka.ru/2017/05/13530>. (дата обращения: 28.04.2025).
14. Savin, A. V. Using Spiral Chain Models for Study of Nanoscroll Structures / A. V. Savin, R. A. Sakovich, M. A. Mazo // *Physical Review B*. 2018. Vol. 97, No 16. P. 165436. <http://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.165436>.
15. Евсеев, А. А. Клеточно-автоматное моделирование диффузионных процессов на триангуляционных сетках / А. А. Евсеев, О. И. Нечаева // *Прикладная дискретная математика*. 2009. № 4. С. 72–83.
16. Development of Kovacs Model for Electrical Conductivity of Carbon Nanofiber–Polymer Systems / S. K. Arjmandi, J. Khademzadeh Yeganeh, Y. Zare, K. Y. Rhee // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26139-5>.
17. Cornean, H. D. A Rigorous Proof of the Landauer–Büttiker Formula / H. D. Cornean, A. Jensen, V. Moldoveanu // *J. Math. Phys.* 2005. Vol. 46, No 4. P. 042106. <http://doi.org/10.1063/1.1862324>.
18. Modeling and Characterization of the Electrical Conductivity on Metal Nanoparticles/Carbon Nanotube/Polymer Composites / Y. Wang, S. Lu, W. He [et al.] // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, No 1. Art. 10448. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14596-x>.
19. Batsanov, S. S. Calculation of van der Waals Radius of Atoms From Bond Distances / S. S. Batsanov // *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*. 1999. Vol. 468, No 1–2. P. 151–159. [https://doi.org/10.1016/S0166-1280\(99\)00077-9](https://doi.org/10.1016/S0166-1280(99)00077-9).

Поступила 03.04.2025    Подписана в печать 02.09.2025    Опубликовано онлайн 30.01.2026

## REFERENCES

1. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M. (2024) Dynamic Processes of Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172> (in Russian).
2. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M. (2024) Spontaneous Overgrowth of Jointing in the Working Chambers of Power Gas-Liquid Thermal Installations – Diffusion Dynamic Processes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (4), 345–362. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-345-362> (in Russian).
3. Rempel A. A., Valeeva A. A., Vokhmintsev A. S., Weinstein I. A. (2021) Titanium Dioxide Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties and Applications. *Russian Chemical Reviews*, 90 (11), 1397–1414. <https://doi.org/10.1070/rcr4991>.
4. Selema T. C., Malevu T. D., Mhlongo M. R., Motlouni S. V., Motaung T. E. (2024) Advancements in Black Titanium Dioxide Nanomaterials for Solar Cells: a Comprehensive Review. *Emergent Materials*, 7 (6), 2163–2188. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00731-z>.
5. Zhao Z., Zhang X., Zhang G., Liu Z., Qu D., Miao X., Feng P., Sun Z. (2015) Effect of Defects on Photocatalytic Activity of Rutile TiO<sub>2</sub> Nanorods. *Nano Research*, 8 (12), 4061–4071. <https://doi.org/10.1007/s12274-015-0917-5>.

6. Barlow Z., Wei Z., Wang R. (2023) Surface and Defect Engineered Polar Titanium Dioxide Nanotubes as an Effective Polysulfide Host for High-Performance Li-S Batteries. *Materials Chemistry and Physics*, 309, 128316. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128316>.
7. Alkanad K., Hezam A., Al-Zaqri N., Bajiri M. A., Alnaggar G., Drmosh Q. A., Almukhlifi H. A., Neratur Krishnappagowda L. (2022) One-Step Hydrothermal Synthesis of Anatase TiO<sub>2</sub> Nanotubes for Efficient Photocatalytic CO<sub>2</sub> Reduction. *ACS Omega*, 7 (43), 38686–38699. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04211>.
8. Klein L., Aparicio M., Jitianu A. (Eds.). (2018) *Handbook of Sol-Gel Science and Technology*. 2<sup>nd</sup> ed. Cham, Switzerland: Springer. 3828. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32101-1>.
9. Liu N., Chen X., Zhang J., Schwank J. W. (2014) A Review on TiO<sub>2</sub>-Based Nanotubes Synthesized via Hydrothermal Method: Formation Mechanism, Structure Modification, and Photocatalytic Applications. *Catalysis Today*, 225, 34–51. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.10.090>.
10. Kavokina S., Samyshkin V., Cao J., Abramov A., Osipov A., Essaka S. P., Khalimov N., Bodunov D., Kavokin A. (2023) Titanium-Based Metasurfaces for Optoelectronics. *Nanomaterials*, 14 (1), 56. <https://doi.org/10.3390/nano140100569>.
11. Kutrovskaya S., Chestnov I., Osipov A., Samyshkin V., Sapegina I., Kavokin A., Kucherik A. (2020) Electric Field Assisted Alignment of Monoatomic Carbon Chains. *Scientific Reports*, 10 (1), 9709. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65356-8>.
12. Agafonova N. A. (2007) Mathematical Foundations of the Phenomenological Method for Constructing Analytical Models of Thermal Power Control Facilities. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, (4), 69–71 (in Russian).
13. Levina A. P. (2017) Review of the Simulation Modeling Method. *Sovremennaya Tekhnika i Tekhnologii = Modern technics and technologies*, (5). Available at: <https://technology.snauka.ru/2017/05/13530> (accessed 28 April 2025) (in Russian).
14. Savin A. V., Sakovich R. A., Mazo M. A. (2018) Using Spiral Chain Models for Study of Nanoscroll Structures. *Physical Review B*, 97 (16), 165436. <https://doi.org/10.1103/physrevb.97.165436>.
15. Evseev A. A., Nechaeva O. I. (2009) Cellular Automaton Modeling of Diffusion Processes on Triangulation Grids. *Prikladnaya Diskretnaya Matematika = Applied Discrete Mathematics*, (4), 72–83 (in Russian).
16. Arjmandi S. K., Khademzadeh Yeganeh J., Zare Y., Rhee K. Y. (2023) Development of Kovacs Model for Electrical Conductivity of Carbon Nanofiber–Polymer Systems. *Scientific Reports*, 13, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26139-5>.
17. Cornean H. D., Jensen A., Moldoveanu V. (2005) A Rigorous Proof of the Landauer–Büttiker formula. *Journal of Mathematical Physics*, 46 (4), 042106. <https://doi.org/10.1063/1.1862324>.
18. Wang Y., Lu S., He W., Gong S., Zhang Y., Zhao X., Fu Y., Zhu Z. (2022) Modeling and Characterization of the Electrical Conductivity on Metal Nanoparticles/Carbon Nanotube/Polymer Composites. *Scientific Reports*, 12 (1), 10448. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14596-x>.
19. Batsanov S. S. (1999) Calculation of van der Waals radii of Atoms From Bond Distances. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 468 (1–2), 151–159. [https://doi.org/10.1016/s0166-1280\(99\)00077-9](https://doi.org/10.1016/s0166-1280(99)00077-9).