

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-517-535>

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 1**

**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.** В исследовании рассмотрено одно из направлений современной наноинженерии поверхности по технологиям управляемого формирования топологических покрытий заданной конфигурации при лазерном воздействии на различные образцы с учетом подходов для сложных нелинейных термодинамических систем с развитием динамических неравновесных процессов. Предлагаемые технологии имеют универсальный характер и весьма перспективны, в частности, для металлических материалов в рабочих камерах теплоэнергетических установок. При этом акцент сделан на новых физических принципах изменения функциональных характеристик материала образца с их оптимизацией под конкретные условия эксплуатации образца с формированием 1D – 3D микро- и наноструктур, в том числе дендритного типа с фрактальными объектами. Использованы методы управляемого лазерного синтеза поверхностных топологических структур в разных схемах эксперимента с лазерной аблацией. Эти регулируемые процессы реализуются на поверхности изделий без изменения объемных характеристик материала в отличие от технологий стандартной его термической обработки, например для повышения износостойкости. В первой части представляемой статьи речь идет о фундаментальной проблеме лазерной термодинамики возникновения дендритных/фрактальных структур на поверхности материала в условиях развития нестационарных теплофизических процессов. Акцент сделан на устойчивых поверхностных состояниях материала при его специализированной предварительной лазерной обработке, включая синтез различных неоднородных и многослойных конфигураций на поверхности с определенной 3D-топологией. Обсуждаются возможности достижения регулируемым способом необходимых характеристик используемого материала для улучшения эксплуатационных свойств различных систем. В частности, это относится и к динамическим газожидкостным теплоэнергетическим установкам при управляемом лазерном наведении регулируемых локальных конфигураций топологических микро- и наноструктур на внутренней металлической поверхности их рабочих камер. В качестве экспериментальной

---

#### **Адрес для переписки**

Рыжова Татьяна Викторовна  
Белорусский национальный технический университет  
Партизанский проспект, 77,  
220107, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 250-36-95  
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

демонстрации рассмотрена микротрещиноватая структура поверхности металлоуглеродных материалов в модели их графитизации.

**Ключевые слова:** улучшение эксплуатационных характеристик теплоэнергетических установок, лазерно-индущиванные микро- и наноструктуры требуемой конфигурации, металлоуглеродные комплексы, энтропия поверхности с неоднородностями, моделирование дендритов, усиление электрического поля на неоднородностях

**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. 1 / Т. В. Рыжова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 6. С. 517–535. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-517-535>

## 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 1

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 study considers one of the areas of modern surface nano-engineering using technologies for controlled formation of topological coatings of a given configuration under laser action on various samples, taking into account approaches for complex nonlinear thermodynamic systems with the development of dynamic non-equilibrium processes. The proposed technologies are universal in nature and are very promising, in particular, for metallic materials in the working chambers of thermal power plants. At the same time, the emphasis is placed on new physical principles for changing the functional characteristics of the sample material with their optimization for specific operating conditions of the sample with the formation of 1D - 3D micro- and nanostructures, including dendritic type with fractal objects. Methods of controlled laser synthesis of surface topological structures were used in different experimental schemes with laser ablation. These controlled processes are implemented on the surface of products without changing the volumetric characteristics of the material, unlike the technologies of its standard heat treatment, for example, to increase wear resistance. Specifically, the first part of the presented article deals with the fundamental problem of laser thermodynamics of the emergence of dendritic/fractal structures on the surface of a material under conditions of the development of non-stationary thermophysical processes. The emphasis is placed on stable surface states of the material during its specialized preliminary laser processing, including the synthesis of various inhomogeneous and multilayer configurations on the surface with a certain 3D topology. The possibilities of achieving the required characteristics of the material used in a controlled manner to improve the performance properties of various systems are discussed. In particular, this also applies to dynamic gas-liquid thermal power plants with controlled laser guidance of adjustable local configurations of topological mi-

cro- and nanostructures on the inner metal surface of their working chambers. As an experimental demonstration, the micro-cracked surface structure of metal-carbon materials was considered within the model of their graphitization

**Keywords:** improving the performance characteristics of thermal power plants, laser-induced micro- and nanostructures of the required configuration, metal-carbon complexes, entropy of a surface with inhomogeneities, modeling of dendrites, amplification of the electric field on inhomogeneities

**For citation:** Ryzhova T. V., Tumarkina D. D., Bukharov D. N., Samishkin V. D., Lelekova A. F., Arakelian M. M., Kucherik A. O., Arakelyan S. M. (2025) 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 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 517–535. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-517-535> (in Russian)

## Введение

Проблема разработки научных подходов и методов при исследовании функциональных характеристик различных материалов и их модификации в заданном направлении для оптимизации в условиях использования в определенных высокотехнологичных секторах промышленности, включая требуемую структуризацию внешних и замкнутых внутренних поверхностей ряда устройств, в том числе и энергетического обеспечения, является ключевой в современном материаловедении. В эксплуатационном аспекте с замкнутыми циклами широкого класса прикладных задач для локализованных систем, например в разномасштабных устройствах и камерах с изменяющимися теплофизическими процессами в них, принципиальное значение имеет состояние поверхности, с которой непосредственно контактирует окружающая среда, включая рабочие вещества реализуемого технологического процесса.

Здесь решающее значение имеют специфические явления, определяемые процессами технической термодинамики в поверхностных слоях. Именно поверхностное состояние материала при соответствующей его предварительной обработке, включая синтез различных неоднородных и многослойных конфигураций на поверхности с определенной 3D-топологией, позволяет осуществлять реализацию комплексных технологических задач при эксплуатации изделий в разных режимах.

Важно подчеркнуть, что подобные формируемые поверхностные структуры являются универсальными в аспекте процедуры их создания с разработанной некоторой маршрутной технологической картой. Она должна основываться на необходимом научно-техническом обосновании с учетом специфических условий реализуемых процессов и выбираемых режимов работы изделий. Принципиальное значение здесь имеет достижение регулируемым способом необходимых характеристик используемого материала для них. Это требует при соответствующих подходах выявлять управляющие параметры для разрабатываемых методик и технологий с целью предварительной поверхностной обработки изделий. Особое значение имеет формирование на поверхности локализованных состояний в каждой

пространственной зоне обработки, когда речь идет о неоднородных поверхностных структурах с заданными параметрами для управления функциональными характеристиками комплексных объектов.

Данные топологические характеристики могут считаться необходимыми по разным причинам – как по конкретным условиям эксплуатации изделия, так и для расширения и получения новых возможностей при разработке элементов и систем на новых физико-технических принципах. В последнем случае должны быть проанализированы фундаментальные процессы, лежащие в основе подобного топологического материаловедения с цифровым моделированием.

На первом этапе рассмотрим эту проблему на примере поверхностной трансформации материала с топологическими структурами определенной конфигурации простых плоских образцов в рамках ряда моделей. Что касается специфики тех конкретных изделий, для которых данные разработанные технологии могут быть применены в соответствующих условиях их эксплуатации, то они не будут являться предметом данного анализа.

В представляемой статье эти вопросы исследованы в рамках достаточно общих форматов лазерной термодинамики при воздействии лазерного излучения на материалы. Они являются дальнейшим развитием соответствующей процедуры анализа и предсказательного моделирования на основе фрактального подхода, изложенного нами, в частности, в работах [1, 2]. Это позволило получить новые принципиальные результаты в такой перспективной области, какой является топологическое цифровое материаловедение с управляемым достижением в лазерном термодинамическом эксперименте требуемых функциональных характеристик поверхности [3–6].

Речь идет о дендритных структурах фрактального типа и дефектах разного класса с регулируемой топологией при их синтезе в условиях лазерной абляции с поверхности материала с управляемым образом получаемыми неоднородными конфигурациями [3–5]. Сам теплофизический механизм возникновения дендритных структур связан с двухэтапным процессом сначала подплавления из-за нагрева при тепловом воздействии лазерного излучения (до температуры не более доли 0,7 от истинной температуры плавления материала), а затем – последующего остывания, которые реализуются за разные времена в определенных режимах воздействия на материалы лазерным пучком [7]. При таких процессах становится возможной модификация ряда функциональных характеристик образцов благодаря возникающим локализованным состояниям в металлических комплексах (например, с низкоуглеродистой сталью AISI 304), включая высокоэнтропийные сплавы, а также металлоуглеродные и алмазоподобные соединения и полупроводниковые материалы (перовскиты).

Некоторые научно-методические подходы с соответствующим компьютерным моделированием при решении данных проблем на путях топологической лазерной термодинамики для ряда этих материалов кратко представлены в настоящей статье при воздействии лазерного излучения на их поверхность в лазерном эксперименте, но в основном речь будет идти

о рассмотрении электрофизики в таких структурах разного элементного/структурного состава.

### **Лазерная термодинамика возникновения дендритных структур на поверхности материала**

**Теплофизические процессы.** Как известно, при облучении лазерным излучением твердого кристаллического тела при микроскопическом рассмотрении происходит взаимодействие квантов света, электронов электронного газа и ионов решеточных структур, а также дефектов различной природы [8]. Процесс выравнивания температуры в такой системе с электрон-фононным взаимодействием происходит за время порядка наносекунд при плотности потока лазерного излучения до  $10^6 \text{ Вт}/\text{см}^2$  с миллисекундной длительностью импульса [9]. И только для длительностей меньших наносекундных лазерных импульсов можно говорить о заметной разности температур между решеточной структурой и электронами, доходящей до тысяч градусов [10].

В наших экспериментах реализовывался первый случай, поэтому рассматривался локальный нагрев из-за поглощения излучения средой в лазерном пучке (для простоты – Гауссова профиля). Происходящий процесс обычной теплопроводности, как правило, в лазерном эксперименте считается нелинейным и нестационарным. При этом происходят явления рассеивания теплоты при проникновении излучения внутрь среды из-за отражения на ее поверхности и испарения вещества. Кроме того, в атмосфере необходимо учитывать потери теплоты на образование окисной пленки на поверхности, изменяющей функциональные свойства образцов. Таким образом, количественный анализ таких процессов является довольно сложной задачей.

Однако оценочно можно считать, что, например, для металлоконтактирующих материалов глубина проникновения теплоты в массивный образец составляет величину  $\approx 50 \text{ мкн}$  [11]. В таком тонком слое поле распределения температуры, очевидно, определяется радиусом светового пятна на поверхности образца и длительностью лазерного импульса. При сканировании лазерного пучка по поверхности образца речь должна идти о модели с движущимся источником теплоты, которая может приводить к поверхностной аморфизации и сглаживанию существующих микронеоднородностей [12].

При используемой нами лазерной абляции образовавшаяся жидккая фаза выбрасывается с поверхности. Это можно рассматривать по аналогии с процессом газодинамического испарения с высокой эффективностью. Данное явление представляется как нестационарный гидродинамический процесс с определенной скоростью движения границы фазового перехода твердое тело – жидкость, которая может демонстрировать экспоненциальный рост со взрывным характером (ср. с [13]) с деформированием поверхности с учетом давления отдачи.

При формировании ванны расплава нас будет интересовать образование разной ориентации дендритных объектов с фрактальной структурой на по-

верхности материала в результате произошедшей неоднородной лазерной абляции и последовательных процессов нагрева–охлаждения. Необходим также учет взаимодействия падающего лазерного излучения с веществом при его выбросе в окружающее пространство при абляции с происходящими физико-химическими процессами в таком облаке. Возникающие в результате этих эффектов на поверхности мелкоигольчатые структуры (с наличием мартенсита и остаточного аустенита для металлических материалов) определяются большими скоростями нагрева и охлаждения в зависимости от режимов при лазерном облучении с происходящей неравномерностью процесса кристаллизации (ср. с [8]). Данные нестационарные процессы составляют отдельное направление исследований при получении материалов с заданными поверхностными свойствами и осаждении на поверхность разных веществ (в том числе и углеродных соединений) – так называемое плакирование.

Рассмотрим эту проблему в достаточно общем термодинамическом представлении (эксперименты нами проводились с нержавеющей низкоуглеродистой сталью AISI 304). Для этого необходимо рассчитать потери теплоты при воздействии, например, непрерывного лазерного излучения. Его энергию  $Q$  примем равной 10 Дж (в эксперименте использовали именно такое ее значение) при нагреве, для примера, нержавеющей стали. При учете потерь энергии при облучении образца на тепловое рассеяние  $Q'$  приходим к значению энергии ионной решетки с образовавшимся дендритом  $Q - Q'$ .

Данная процедура расчета проведена ниже на основе известных соотношений (например, [14, 15])  $Q' = - \int \lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF dt$ , где  $Q'$  – потери на тепловое рассеяние;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\partial t$  – изменение температуры поверхности;  $\partial n$  – единичный вектор нормали к поверхности;  $dF$  – элемент поверхности;  $d\tau$  – дифференциал по времени.

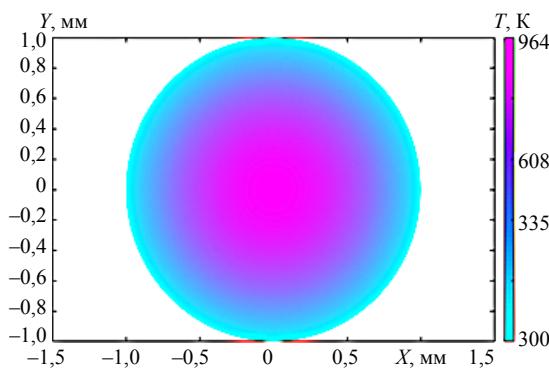
Если рассматривать композит в рамках стандартной модели электронного газа, то  $\lambda = \frac{1}{3} v l C_v$ , где  $v$  – средняя скорость теплового движения свободных электронов (с зарядом  $e$  и массой  $m$ );  $l$  – длина свободного пробега для электронов (берем ее приближенно равной параметру элементарной ячейки кристаллического тела – кубическая решетка с постоянной решетки  $a = 3,4 \cdot 10^{-6}$  м);  $C_v$  – изохорная теплоемкость единицы электронного газа.

Скорость рассеяния энергии  $v$  находим из сравнения следующих двух соотношений [14, 15] для удельной электропроводимости:  $\sigma = \frac{n_e e^2 l}{m v}$  и  $\sigma = \frac{\lambda}{\frac{3}{2} (k/e)^2 T} = \frac{\frac{1}{3} v l C_v}{\frac{3}{2} (k/e)^2 T}$ , где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура нагрева металла.

Следовательно, учитывая, что  $C_v = \frac{3}{2} n_e k$ , имеем  $\nu = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$ , где  $n_e$  – плотность числа электронов.

Тогда для  $n_e$  получаем:  $n_e \approx 2,04 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ . Здесь учитываем распределение электронов по ячейкам Хунда: у железа (4S14P3) – 4 свободных электрона, у углерода – тоже 4 свободных электрона (2S22P6); объем элементарной ячейки  $3,93 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3$ .

Изменение температуры в области формирования дендритов на поверхности образца при лазерном нагреве (оценка дает значение 608 К) по отношению к комнатной температуре (300 К) составляет разницу  $608 \text{ K} - 300 \text{ K} = 308 \text{ K}$ . Все теплофизические расчеты сделаны согласно модели распределения температуры вдоль поверхности, полученной в среде Matlab Laser Toolbox [16], и наглядная картинка приведена на рис. 1 (ср. с [17]).



*Rис. 1. График распределения температуры  $T$  на поверхности (координаты  $X-Y$ ) нержавеющей стали при воздействии лазерного пучка радиусом 2,0 мм.*

Показана область возникновения дендритов. Соответствующая температура указана цветом, и она зависит от времени лазерного облучения.

Приведенная сине-фиолетовая область – реализация синтеза дендритов

*Fig.1. Temperature distribution graph  $T$  on the surface ( $X-Y$  coordinates) of stainless steel under the influence of a laser beam with a radius of 2,0 mm. The area of dendrite formation is shown. The corresponding temperature is indicated by color, and it depends on the laser irradiation time.*

*The blue-violet area shown is the implementation of dendrite synthesis*

Как видно из рис. 1, изменение радиуса области нагрева и формирование дендритов (сине-фиолетовый цвет – ср. с [18]) происходит в диапазоне примерно от 0,5 до 0,65 мм. При этом по времени процесса нагревания (время воздействия лазерного излучения) в лазерном пучке имеем: 1,0 мс соответствует достижению температуры 335 К; 1,5 мс – температуре 608 К; для времени лазерного облучения 3 мс имеем температуру 964 К; в центре лазерного пятна достигается температура 1121 К для времени облучения 4,5 мс.

Таким образом, получаем, что потери на тепловое рассеяние за 1 с ничтожны:  $Q' \approx 3,67 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$ , что приводит к энергии ионной решетки ма-

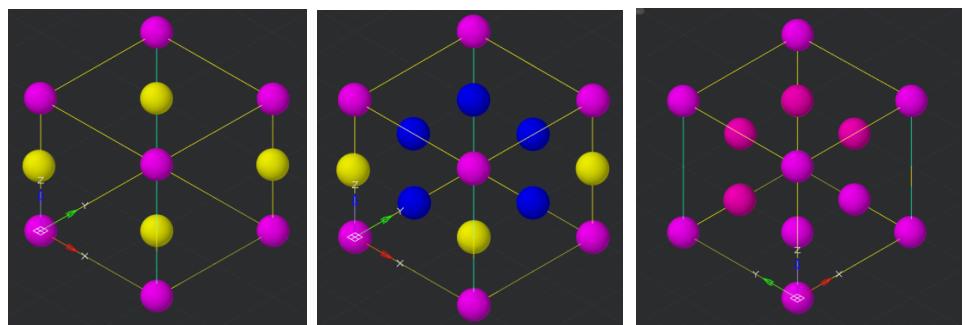
териала той же величины, что и энергия самого лазерного излучения  $Q \approx 10$  Дж. Если говорить об интерпретации данного значения – это фактически энергетический параметр типа потенциальной энергии в системе.

**Влияние точечных дефектов и параметров фракталов на величину энтропии дендритов.** Рассмотрение проведем для определенности для перовскитов с точечными дефектами, которые в этом случае представляют собой примесные полупроводники.

Зафиксируем в качестве примера стехиометрическую формулу вещества в виде  $\text{FeCr}_{0,6}\text{Ni}_{0,1}\text{Mn}_{0,3}\text{CO}_3$  [19], что соответствует структурному типу  $ABX_3$  перовскита, обладающего высокой эффективностью фотопроводимости [20–21]. При приблизительно одинаковой концентрации составляющих элементов сплава он относится к высокоэнтропийным сплавам.

Равномерная концентрация атомов в кубической ячейке для элементного состава дендрита представляет собой перовскит с заполненными атомами углерода в тетраэдрических порах в серединах вертикальных ребер кристаллической структуры, что соответствует кубической объемно-центрированной ячейке [22, 23], как показано на рис. 2.

Согласно [24], термодинамическое фазовое состояние на поверхности образца после окисления будет представлять собой мартенсит, эволюция которого в зависимости от элементного состава приведена на рис. 2. Слева на рисунке показан мартенсит: в тетрагональных порах и в центрах верхней и нижней граней его кубической структуры – атомы углерода, в углах внутри и в центре – атомы железа, в центре – перовскит: в его тетрагональных порах находится углерод, железо – в углах, кислород – в центрах граней. Дополнительно в центрах кубических ячеек чередуются атомы никеля с вероятностью присутствия 0,1, атомы марганца – с вероятностью 0,3, атомы хрома – с вероятностью 0,6. Справа на рис. 2 показана нержавеющая сталь: в центре кубической ячейки находится углерод (его не видно в представленных 2D-проекциях), остальные шары в центрах граней и в углах – железо.



Rис. 2. Схемы кубической кристаллической структуры дендрита в рентгено-дифракционном представлении его состава. Желтый шар – атомы C, фиолетовый шар – Fe, синий шар – O.  
 Слева направо представлены мартенсит, перовскит, нержавеющая сталь

Fig. 2. Schemes of the cubic crystal structure of dendrite in the X-ray diffraction representation of its composition. Yellow ball – C atoms, purple ball – Fe, blue ball – O.  
 From left to right are martensite, perovskite, stainless steel

Теперь рассмотрим в общем виде влияние точечных дефектов и геометрических параметров фрактала на величину энтропии в подобных структурах.

В работе [25] представлен, например, фрактальный агрегат – рыхлая структура, состоящая из одинаковых частиц, причем ближайшие соседи частиц образуют химическую связь в зонах контакта. Эта фрактальная форма и будет использоваться нами для описания топологии дендритов.

Масса  $m_0$  образовавшегося дендрита вычисляется очевидным способом

$$m_0 = \frac{k}{S} \sum_l \frac{k_l \mu_l}{n},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $k_l$  – число одинаковых атомов  $l$ -го элемента в химической формуле соединения;  $\mu_l$  – молярная масса  $l$ -го элемента;  $S$  – поверхностная энтропия, равная 12,26 Дж/(моль · К), для данного состава сплава [26] параметр  $n$  взят нами из [27]:  $n = (R/b)^D$ , где  $D$  – фрактальная размерность (она равна в наших оценках 1,7);  $R$  – радиус сферы, описанной вокруг кубической ячейки;  $b$  – то же окружности вокруг фрактального агрегата.

Таким образом, управляемыми параметрами являются  $R/b$  для дендритов: через  $R$  определяется поверхностная площадь многогранника структуры (октаэдра) и  $b$  – площадь поверхности дендрита, которая хорошо аппроксимируется тетрагональной пирамидой (в нашей модели она в 2 раза меньше площади октаэдра).

Приведем некоторые численные оценки для рассматриваемого случая. Объем  $V$  пирамиды дендрита равен  $27,67 \cdot 10^{-18}$  м<sup>3</sup>. Плотность среды находим из очевидного соотношения  $\rho = \frac{m_0}{V}$ , где  $V$  – объем дендрита;  $m_0$  – масса дендрита. Тогда имеем:  $m_0 = 5,88 \cdot 10^{-26}$  кг;  $\rho = 2,12$  г/см<sup>3</sup>.

Плотность среды примерно соответствует плотности перовскита (2–4 г/см<sup>3</sup>). Таким образом, изначально, до начала процесса восстановления металла из композита, образуется структура кубического перовскита с заполненными тетрагональными порами.

Согласно [28], параметр кубической ячейки такой структуры находится из соотношения

$$a = \sqrt[3]{\frac{n\mu}{\rho k N_a}},$$

где  $n$  – число одинаковых атомов, приходящихся на элементарную ячейку;  $\mu$  – молярная масса;  $\rho$  – плотность;  $k$  – число одинаковых атомов в химической формуле соединения;  $N_a$  – число Авогадро.

Для кубической ячейки рассматриваемого нами перовскита параметр  $a$  находится из соотношения

$$a = \sqrt[3]{\frac{\sum_l \mu_l}{\rho \sum_l k_l N_a}},$$

где  $l$  – число элементов, по которым идет суммирование.

Отсюда получаем, что параметр ячейки  $a = 3,4$  мкм. Таким образом, приведенное простое рассмотрение позволяет оценить численные значения некоторых параметров для возникшей дендритной структуры.

Предложенные модели также позволяют произвести оценку размеров сформированных дендритов. Переходя к абсолютным размерам с учетом длины стороны ячейки используемой нами расчетной области 10 нм, получаем величины радиусов окружностей минимального покрытия для островковых дендритных структур порядка 100–400 нм. При этом оказалось, что локальная поверхностная энтропия  $s_i$ , следуя энтропийной процедуре, применяемой для сплавов [29], приводит к поверхностной интегрированной энтропии смешения  $s_{sm}$  с увеличением ее значения в среднем от 7 до 13 Дж/(моль · К), то есть появляются достаточно большие различия значений энтропии смешения на поверхности.

Размеры блоков закристаллизовавшегося металла после лазерной абляции составляют величину в несколько десятков нанометров, что на порядок меньше неоднородностей в исходном образце. Мы здесь не рассматриваем процессы плакирования для предварительно нанесенного на поверхность образца покрытия материала из сплавов с последующим его затвердеванием после быстрого охлаждения.

### **Микротрешиноватая структура поверхности металлоуглеродных материалов – модели графитизации и усиление электрического поля на локализованных дендритах**

В аспекте образования металлоуглеродных соединений необходимо рассматривать вопросы синтеза карбидов на поверхности под воздействием лазерного излучения в атмосфере воздуха с углекислым газом; толщина такого слоя с измененной структурой карбида составляет величину в десятки микрон и может приводить к образованию пленок алмазов.

Достижение такого результата происходит в лазерных пучках с относительно скромными мощностными характеристиками в соответствующих схемах лазерной абляции [30]. Поскольку речь идет о вполне управляемых процессах, их можно рассматривать как один из инструментов для решения задач цифрового материаловедения с топологическими неоднородными структурами с экстремальными функциональными характеристиками на локальных неоднородностях дендритного/фрактального типов.

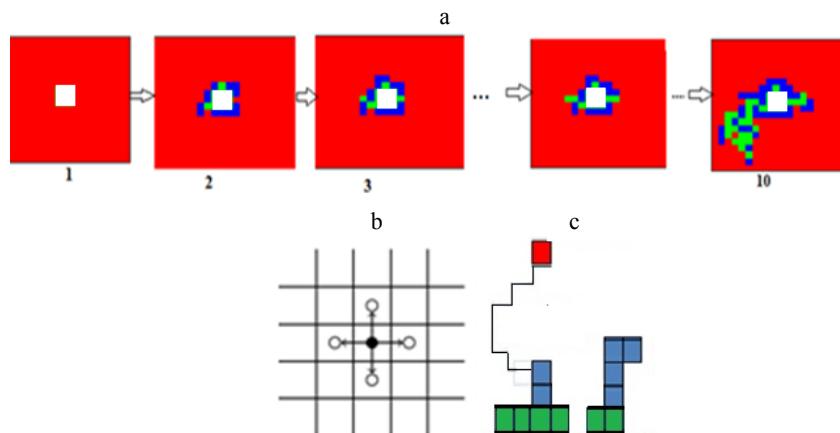
В общем случае явление подобной графитизации может быть объяснено в рамках лазерного формирования многочисленных «центров активации», покрывающих внутреннюю поверхность объекта с микротрецинами. Такой процесс удобно рассматривать в диффузионном приближении по механизму направленной перколяции [31–33], а саму систему возникающих на поверхности тела микротрецин – в рамках диффузионно-ограниченной агрегации (DLA) [34, 35].

Реализация указанных приближений проводилась на прямоугольной расчетной области с наложенной равномерной сеткой с расположеннымными в ячейках сети центрами активации, от которых начинала распространяться графитизированная область.

Модели перколяции и диффузионно-ограниченной агрегации реализовывались на основе клеточного автомата с окрестностью Неймана [36] (рис. 3).

Для построения области графитизации на основе модели перколяции рассматривался динамический процесс, в котором в данный момент времени ячейка расчетной области становится графитизированной с заданной вероятностью ( $p$ ) с учетом того, что ее соседние ячейки уже сменили свое состояние на графитизированное. Эта величина вероятности ( $p$ ) в относительном виде определяла величину области графитизации, зависящую от скорости движения фронта графитизации. Она зависела от прогрева системы, а значит, и от скорости движения каустики.

Система микротрецин моделировалась в приближении диффузионно-ограниченной агрегации (DLA), когда модельные частицы «дефекты» совершили случайные блуждания и с заданной вероятностью ( $s$ ) агрегировали с ранее сформированной системой. Значение величины  $s$  определяло степень разветвленности системы трещин. С увеличением  $s$  трещины становились более разветвленными.



*Rис. 3. Схемы модельных приближений: перколяционное (а), окрестность Неймана (б), DLA (в)*

*Fig. 3. Schemes of model approximations: percolation (a), Neumann neighborhood (b), DLA (c)*

На рис. 4 приведены модели областей графитизации для изотермического поля температуры в случае варьирования вероятности графитизации  $p$ .

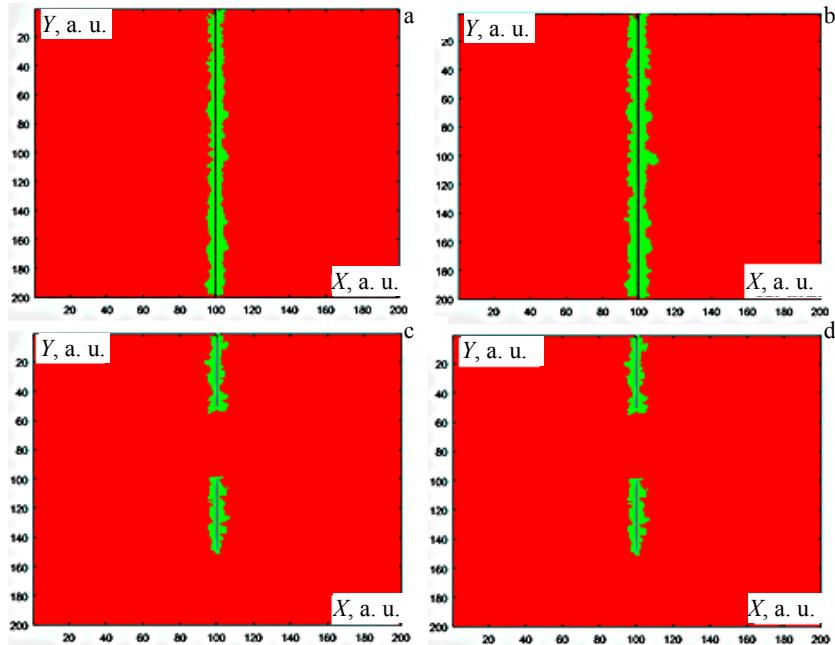


Рис. 4. Модели области графитизации для изотермического случая при:  
 $p = 0,09$  от непрерывной прямой (а),  $p = 0,11$  от непрерывной прямой (б),  
 $p = 0,10$  от системы двух непересекающихся прямых (с),  
 $p = 0,11$  от системы трещин в приближении DLA при  $s = 0,9$  (д)

Fig. 4. Models of the graphitization region for the isothermal case at:  
 $p = 0.09$  from a continuous straight line (a),  $p = 0.11$  from a continuous straight line (b),  
 $p = 0.1$  from a system of two disjoint straight lines (c),  
 $p = 0.11$  from a crack system in the DLA approximation at  $s = 0.9$  (d)

Полученные модели могут быть соотнесены с реальными структурами (рис. 5).

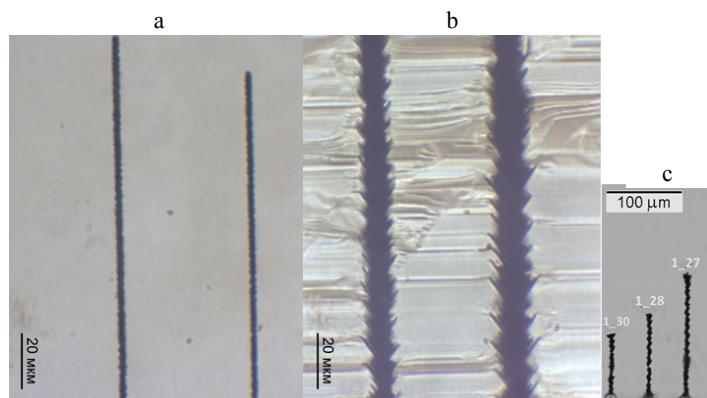
Разница моделей и реальных структур по фракタルным размерностям, рассчитанным методом box-counting [37], не превосходили величины  $10^{-2}$ , что свидетельствовало о хорошей адекватности предложенного приближения.

Приведем кратко простые модельные оценки в рамках представлений о фрактальных островковых структурах с усилением электрического поля на подобных локализованных объектах. Рассмотрим напряженность электрического поля на острие изолированной фрактальной структуры в виде вертикального конуса как

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r, \text{ где } R - \text{радиус острия. Положим,}$$

что конец острия представлен шаром радиуса  $R$ . Тогда напряженность поля на острие можно оценить как  $E_b(R) \sim \frac{1}{R^2}$  и усиление  $G$  поля будет

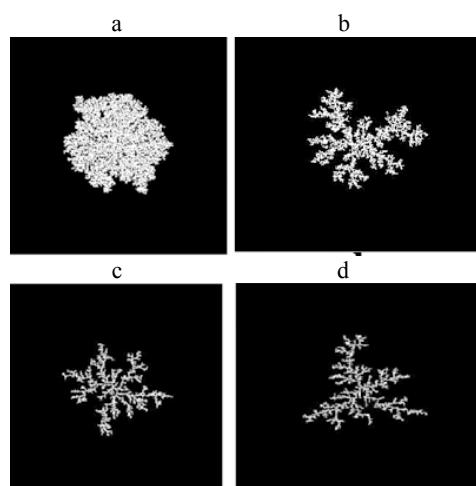
$$G = \frac{E_b}{E_f}, \text{ где } E_f \sim \frac{1}{R_f^2}; R_f - \text{радиус окружности минимального покрытия [38].}$$



*Рис. 5. Увеличенное оптическое изображение графитизированных нитей, созданных при использовании энергии лазерного импульса: а – низкой (0,3–0,4 мкДж); б – высокой (4,7–7,0 мкДж). Скорость варьирования фокуса оптического излучения по поверхности образца  $v_a = 25$  мкм/с; частота следования лазерных импульсов  $f = 1$  кГц; с – оптический снимок графитизированных нитей при энергии импульса 2,08 мкДж, созданных при варьировании скорости фокуса в диапазоне:  $v_a = 1250$  мкм/с (отмечено как 1\_30),  $v_a = 1200$  мкм/с (отмечено как 1\_28),  $v_a = 1150$  мкм/с (отмечено как 1\_27)*

*Fig. 5. Enlarged optical image of graphitized threads created using laser pulse energy: low (0.3–0.4  $\mu$ J) (a) and high (4.7–7.0  $\mu$ J) (b). The rate of variation of the optical radiation focus over the sample surface is  $v_a = 25$   $\mu$ m/s; the laser pulse repetition frequency is  $f = 1$  kHz; c – optical image of graphitized threads at a pulse energy of 2.08  $\mu$ J, created by varying the focal speed in the range of  $v_a = 1250$   $\mu$ m/s (marked in Figure as 1\_30),  $v_a = 1200$   $\mu$ m/s (marked as 1\_28),  $v_a = 1150$   $\mu$ m/s (marked as 1\_27)*

Оценим относительное усиление электрического поля для латеральных фигур из рис. 6, когда относительный диаметр окружности минимального покрытия составлял значение 16 о. е.



*Рис. 6. Модельные изображения DLA-фрактальных структур островка, возникающих при величине вероятности  $s$  агрегации частиц: а – 0,01; б – 0,10; в – 0,50; г – 1,00*

*Fig. 6. Model images of DLA fractal island structures arising at particle aggregation probability  $s$ : a – 0.01; b – 0.10; c – 0.50; d – 1.00*

В табл. 1 сведены расчетные значения по фрагментам конфигураций рис. 6 – для длинных ветвей, которыми назовем ветви, включающие в себя не менее трех элементов в относительных единицах. Под общим усилением понимается произведение усиления на одном конце, умноженного на число рассматриваемых фрактальных отростков.

*Таблица 1*  
**Оценка усиления на фрактальных структурах**  
**Gain assessment on fractal structures**

Обозначение рисунков	Число ветвей – длинных	Количество фрактальных отростков у длинных ветвей	Средний радиус отростков ветвей (о. е.)	Усиление на изолированном конце отростка длинной ветви	Общее усиление (от всех концов отростков)
a	3	6	1	64	384
b	7	22	0,5	256	$5,632 \cdot 10^3$
c	8	34	0,5	256	$8,704 \cdot 10^4$
d	14	45	0,5	256	$1,152 \cdot 10^4$

Таким образом, на модельных образцах можно добиться относительно-го усиления, составляющего величину порядка в  $10^3$ – $10^4$  раз, учитывая только основные ветви. При рассмотрении всего периметра фигуры для разветвленных фракталов оценка приводит к относительному усилению порядка в  $10^5$ – $10^6$  раз при умножении на число длинных ветвей.

Указанные численные значения основываются на модели, когда в зависимости от количества фрактальных отрезков происходит увеличение усиления. Для электропроводимости здесь можно говорить об аналогии с возрастанием тока при увеличении поперечного сечения проводника при прочих равных условиях.

## ВЫВОДЫ

1. В статье рассмотрены методы оптимизации технологических параметров процесса лазерной послойной микро- и наномодификации поверхности с использованием разных схем лазерной аблации. Полученные результаты могут быть использованы в технологиях улучшения эксплуатационных характеристик динамических газожидкостных теплоэнергетических установок при управляемом лазерном индуцировании регулируемых локальных конфигураций топологических микро- иnanoструктур на внутренней металлической поверхности рабочих камер с учетом критериев прочности, износстойкости, точности воспроизведения их требуемых характеристик.

2. Представляемые технологии могут найти применение при улучшении функциональных характеристик различных деталей энергетических установок с помощью их лазерной обработки с нанесением послойной лазерной микро- и наномодификации поверхности, а также способствовать разработке лазерно-гибридных технологий универсального предназначения

с улучшением эксплуатационных характеристик при создании энергетических установок разного типа. С этой целью разработано математическое и программное обеспечение и реализованы демонстрационные экспериментальные исследования процесса послойной лазерной микро- и наномодификации поверхности ответственных деталей энергетических установок при использовании различных источников лазерного излучения с соответствующими пространственно-временными параметрами.

3. Полученные соответствующие экспериментальные результаты с предварительно индуцированными/нанесенными (наплавленными) структурами с лазерной послойной микро- и наномодификацией поверхности могут быть использованы в формате прототипов при разработке предложений и рекомендаций по реализации (коммерциализации) результатов данного исследования и вовлечения их в хозяйственный оборот.

Моделирование областей графитизации выполнено частично в рамках Государственного задания в области научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по научному проекту FZUN-2024-0018.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, М. М. Аракелян, С. М. Аракелян // 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, Д. Н. Бухаров, М. М. Аракелян, С. М. Аракелян // 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. Электрофизика углеродных 1D-структур, полученных в лазерном эксперименте: модели и демонстрация / С. В. Гарнов, Д. В. Абрамов, Д. Н. Бухаров [и др.] // Успехи физических наук. 2024. Т. 194, № 2. С. 115–137. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.12.039620>.
4. Synthesis of Allotropic Forms of Carbon in a Laser Experiment: 1D–3D Topological Configurations with Carbon Nanotubes and Diamond-Like Systems / K. S. Khorkov, D. N. Bukharov, Ya. V. Podoprigora [et al.] // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2024. Vol. 88. P. 2022–2033. <https://doi.org/10.1134/S1062873824708638>.
5. Bukharov, D. N. Nanocluster Fractal Electrical Conductivity in Thin Films on a Solid Surface: Dimensional Models of Different Configurations and Demonstration of Results in a Laser Experiment / D. N. Bukharov, A. O. Kucherik, S. M. Arakelian // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2023. Vol. 8, No 3. P. 227–251. <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.03.01.227-251>.
6. Technologies for Controlled Synthesis and Characteristics of Thin-Layer Topological Nanoobjects and Nanoclusters under Laser Irradiation on Solid Targets: Algorithms and Modeling, Quantum Bistability in 1D-Microstructures and Analogy with Carbon Nanotubes / D. N. Bukharov, T. A. Khudayberganov, A. G. Tkachev, S. M. Arakelian // Journal of Advanced Materials and Technologies. 2024. Vol. 9, No 1. P. 60–74. <https://doi.org/10.17277/jamt.2024.01.060-074>.
7. Александров, Д. В. Дендритный рост с вынужденной конвекцией: методы анализа и экспериментальные тесты / Д. В. Александров, П. К. Галенко // Успехи физических наук. 2014. Т. 184, № 8. С. 833–850. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0184.201408b.0833>.

8. The Crossover between Tunnel and Hopping Conductivity in Granulated Films of Noble Metals / A. Kavokin, S. Kutrovskaya, A. Kucherik [et al.] // Superlattices and Microstructures. 2017. V. 111. P. 335–339. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.06.050>.
9. Электрические характеристики полимерных композитов, содержащих углеродные нанотрубки / А. В. Елецкий, А. А. Книжник, Б. В. Потапкин, Х. М. Кенни // Успехи физических наук. 2015. Т. 185, № 3. С. 225–270. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0185.201503a.0225>.
10. Bauhofer, W. A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites / W. Bauhofer, J. Z. Kovacs // Composites Science and Technology. 2009. Vol. 69, No 10. P. 1486–1498. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.018>.
11. Елецкий, А. В. Транспортные свойства углеродных нанотрубок / А. В. Елецкий // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 3. С. 225–242. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0179.200903a.0225>.
12. The Dominant Role of Tunneling in the Conductivity of Carbon Nanofiber Epoxy Composites / P. Cardoso, P. Cardoso, J. Silva, A. J. Paleo [et al.] // Physica Status Solidi (A). 2010. Vol. 207, No 2. P. 407–410. <https://doi.org/10.1002/pssa.200925334>.
13. Charge Transport and Tunneling in Single-Walled Carbon Nanotube Bundles / M. Salvato, M. Cirillo, M. Lucci [et al.] // Physical Review Letters. 2008. Vol. 101, No 24. P. 246804. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.246804>.
14. The Laser-Assisted Synthesis of Linear Carbon Chains Stabilized by Noble Metal Particle / A. O. Kucherik, A. V. Osipov, S. M. Arakelian [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1164. P. 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1164/1/012006>.
15. Forgerini, F. L. A Brief Review of Mathematical Models of Thin Film Growth and Surfaces: A Possible Route to Avoid Defects in Stents / F. L. Forgerini, R. Marchiori // Biomatter. 2014. Vol. 4, No 1. P. 28871. <https://doi.org/10.4161/biom.28871>.
16. Römer, G. R. B. E. Matlab Laser Toolbox / G. R. B. E. Römer, A. J. Huis in 't Veld // Physics Procedia. 2010. Vol. 5, Part B. P. 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.068>.
17. Самарский, А. А. Вычислительная термодинамика / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: URSS, 2020. 784 с.
18. Бухаров, Д. Н. Термодиффузионная модель системы нанокластеров теллурида свинца / Д. Н. Бухаров // Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: сб. трудов XVIII Всерос. конф. молодых ученых. Саратов: Техно-Декор, 2023. С. 36–37.
19. Zuev, A. Yu. Defect Structure and Oxide Ion Transport in Sr- and Cr-doped LaCoO<sub>3-δ</sub> / A. Yu. Zuev, A. I. Vylkov, D. S. Tsvetkov // Solid State Ionics. 2011. Vol. 192, No 1. P. 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.05.049>.
20. Low-Field Onset of Wannier-Stark Localization in a Polycrystalline Hybrid Organic Inorganic Perovskite / D. Berghoff, J. Bühlert, M. Bonn [et al.] // Nature Communications. 2021. Vol. 12, No 1. P. 5719. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26021-4>.
21. Frey, P. Realization of a Discrete Time Crystal on 57 Qubits of a Quantum Computer/ P. Frey, S. Rachel // Science Advances. 2022. Vol. 8, No 9. P. 7652. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7652>.
22. Preparation, Characterization, and Modeling of Carbon Nanofiber/Epoxy Nanocomposites / L.-H. Sun, Z. Ounaies, Zoubeida, X.-L. Gao [et al.] // Journal of Nanomaterials. 2011. Vol. 2011. Art. 307589. <https://doi.org/10.1155/2011/307589>.
23. Magomedov, M.N. On the Baric Fragmentation of a Crystal / M. N. Magomedov // Physics of the Solid State. 2003. Vol. 45, No 5. P. 953–956. <http://doi.org/10.1134/1.1575343>.
24. Laser-Induced Synthesis of Nanostructured Metal-Carbon Clusters and Complexes / S. Arakelian, S. Kutrovskaya, A. Kucherik [et al.] // Optical and Quantum Electronics. 2016. Vol. 48, No 11. Art. No 505. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0776-7>.
25. Cannella, C. B. Carbyne Fiber Synthesis within Evaporating Metallic Liquid Carbon / C. B. Cannella, N. Goldman // The Journal of Physical Chemistry C. 2015. Vol. 119, No 37. P. 21605–21611. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b03781>.
26. Long Linear Carbon Chain – Laser-Induced Structures and Possible Applications / S. V. Kutrovskaya, S. M. Arakelian, A. O. Kucherik [et al.] // Laser Physics. 2019. Vol. 29, No 8. P. 085901. <http://doi.org/10.1088/1555-6611/ab183a>.
27. Two-Step Laser-Induced Synthesis of Linear Carbon Chains / A. O. Kucherik, S. M. Arakelian, S. V. Garnov [et al.] // Kvantovaya elektronika = Quantum Electronics. 2016. Vol. 46, No 7. P. 627–633. <http://doi.org/10.1070/QEL16128>.

28. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Изд. 5-е, стер. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. V. Статистическая физика. Ч. 1. 616 с.
29. Поверхностная топология энтропии смешения в результате двухимпульсной лазерной аблации нержавеющей стали / Д. Д. Тумаркина, О. Я. Бутковский, А. В. Болачков, А. А. Бурцев // Физико-химические аспекты изучения кластеров,nanoструктур и наноматериалов. 2023. Вып. 15. С. 869–878. <http://doi.org/10.26456/pcascn/2023.15.869>.
30. Структура и физико-химические свойства наноструктурированных пленок оксидов металлов – чувствительного слоя газовых сенсоров / Т. В. Бельшева, А. К. Гатин, М. В. Гришин [и др.] // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 9. С. 56. <https://doi.org/10.7868/S0207401X15090046>.
31. Eden Model Simulation of Re-Epithelialization and Angiogenesis of an Epidermal Wound / E. Aggingi, L. Wakabayashi, T. Wiandt, S. Maggelakis // Processes. 2018. Vol. 6, No 11. P. 207. <https://doi.org/10.3390/pr6110207>.
32. Москалев, П. В. Анализ структуры переколяционного кластера / П. В. Москалев // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, № 6. С. 1–7.
33. Рыжикова, Ю. В. Фрактальные свойства самоорганизующихся дендритных структур / Ю. В. Рыжикова, С. Б. Рыжиков // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2018. №. 5. С. 1850401-1-1850401-7.
34. Mroczka, J. Algorithms and Methods for Analysis of the Optical Structure Factor of Fractal Aggregates/ J. Mroczka, M. Woźniak, F.R.A. Onofri// Metrology and Measurement Systems. 2012. Vol. 19, No 3. P. 459–470. <http://doi.org/10.2478/v10178-012-0039-2>.
35. Çağdaş, A., Diffusion Limited Aggregation via Python: Dendritic Structures and Algorithmic Art / A. Çağdaş, Y. Allahverdi // Journal of Scientific Reports-A. 2024. Vol. 58. P. 99–112. <https://doi.org/10.59313/jsr-a.1454389>.
36. Zaitsev, D. A. A Generalized Neighborhood for Cellular Automata / D. A. Zaitsev // Theoretical Computer Science. 2017. Vol. 666. P. 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
37. Ампилова, Н. Б. Алгоритмы фрактального анализа изображений / Н. Б. Ампилова, И. П. Соловьев // Компьютерные инструменты в образовании. 2012. № 2. С. 19–24.
38. Исмагилов, Р. Г. Электрическое поле вблизи проводящего остряя / Р. Г. Исмагилов // Технологии. Инновации. Связь: сб. материалов научно-практ. конф. СПб., 2022. С. 39–41.

Поступила 03.04.2025 Подписана в печать 02.09.2025 Опубликована онлайн 28.11.2025

## REFERENCES

1. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan 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., Arakelian 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. Garnov S. V., Abramov D. V., Bukharov D. N., Khudaiberganov T. A., Khor'kov K. S., Osipov A. V., Zhirnova S. V., Kucherik A. O., Arakelyan S. M. (2023). Electrophysics of 1D-Carbon Structures Obtained in a Laser Experiment: Models and Demonstration. *Physics-Uspekhi*, 67 (02), 109–128. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.12.039620>.
4. Khorkov K. S., Bukharov D. N., Podoprigora Ya. V., Burakova I. V., Burakov A. E., Kucherik A. O., Tkachev A. G., Arakelyan S. M. (2024) Synthesis of Allotropic Forms of Carbon in a Laser Experiment: 1D–3D Topological Configurations with Carbon Nanotubes

- and Diamond-Like Systems. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 88 (12), 2022–2033. <https://doi.org/10.1134/s1062873824708638>.
5. Bukharov D. N., Kucherik A. O., Arakelian S. M. (2023) Nanocluster Fractal Electrical Conductivity in Thin Films on a Solid Surface: Dimensional Models of Different Configurations and Demonstration of Results in a Laser Experiment. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, 8 (3), 227–251. <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.03.pp.227-251>.
  6. Bukharov D., Khudaiberganov T., Tkachev A., Arakelian S. (2024). Technologies for Controlled synthesis and Characteristics of Thin-Layer Topological Nanoobjects and Nanoclusters Under Laser Irradiation on Solid Targets: Algorithms and Modeling, Quantum Bistability in 1D-Microstructures and Analogy with Carbon Nanotubes. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 9 (1), 60–74. <https://doi.org/10.17277/jamt.2024.01.pp.060-074>.
  7. Alexandrov D. V., Galenko P. K. (2014) Dendrite Growth under Forced Convection: Analysis Methods and Experimental Tests. *Physics Uspekhi*, 57 (8), 771–786. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0184.201408b.0833>.
  8. Kavokin A., Kutrovskaya S., Kucherik A., Osipov A., Vartanyan T., Arakelyan S. (2017) The Crossover Between Tunnel and Hopping Conductivity in Granulated Films of Noble Metals. *Superlattices and Microstructures*, 111, 335–339. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.06.050>.
  9. Eletskii A. V., Knizhnik A. A., Potapkin B. V., Kenny J. M. (2015) Electrical Characteristics of Carbon Nanotube Doped Composites. *Physics – Uspekhi*, 58 (3), 209–251. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0185.201503a.0225>.
  10. Bauhofer W., Kovacs J. Z. (2009) A Review and Analysis of Electrical Percolation in Carbon Nanotube Polymer Composites. *Composites Science and Technology*, 69 (10), 1486–1498. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.06.018>.
  11. Eletsky A. V. (2009) Transport Properties of Carbon Nanotubes. *Physics – Uspekhi*, 52 (3), 209–224. <https://doi.org/10.3367/ufne.0179.200903a.0225>.
  12. Cardoso P., Silva J., Paleo A. J., van Hattum F. W. J., Simoes R., Lanceros-Méndez S. (2010) The Dominant Role of Tunneling in the Conductivity of Carbon Nanofiber Epoxy Composites. *Physica Status Solidi (a)*, 207 (2), 407–410. <https://doi.org/10.1002/pssa.200925334>.
  13. Salvato M., Cirillo M., Lucci M., Orlanducci S., Ottaviani I., Terranova M. L., Toschi F. (2008) Charge Transport and Tunneling in Single-Walled Carbon Nanotube Bundles. *Physical Review Letters*, 101 (24). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.101.246804>.
  14. Kucherik A. O., Osipov A. V., Arakelian S. M., Garnov S. V., Povolotckaya A. V., Kutrovskaya S. V. (2019) The Laser-Assisted Synthesis of Linear Carbon Chains Stabilized by Noble Metal Particle. *Journal of Physics: Conference Series*, 1164, 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1164/1/012006>.
  15. Forgerini F. L., Marchiori R. (2014) A Brief Review of Mathematical Models of Thin Film Growth and Surfaces: A Possible Route to Avoid Defects in Stents. *Biomatter*, 2014. V. 4, No 1. P. 28871. <https://doi.org/10.4161/biom.28871>.
  16. Römer G. R. B. E., Huis in 't Veld A. J. (2010) Matlab Laser Toolbox. *Physics Procedia*, 5, Part B, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.068>.
  17. Samarsky A. A., Vabishevich P. N. (2020) *Computational Thermodynamics*. Moscow, URSS Publ. 784 (in Russian).
  18. Bukharov D. N. (2023) Thermal Diffusion Model of a System of Lead Telluride Nanoclusters. *Nanoelektronika, nanofotonika i nelineinaya fizika: sb. trudov XVIII Vseros. konf. molodykh uchenykh* [Nanoelectronics, Nanophotonics and Nonlinear Physics: Collection of Works of the 18<sup>th</sup> All-Russian Conference of Young Scientists]. Saratov, Techno-Décor Publ. 227 (in Russian).
  19. Zuev A. Yu., Vylkov A. I., Tsvetkov D. S. (2011) Defect Structure and Oxide Ion Transport in Sr- and Cr-doped LaCoO<sub>3-δ</sub>. *Solid State Ionics*, 192 (1), 220–224. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2010.05.049>.
  20. Berghoff D., Bühl J., Bonn M., Leitenstorfer A., Meier T., Kim H. (2021) Low-Field Onset of Wannier-Stark Localization in a Polycrystalline Hybrid Organic Inorganic Perovskite. *Nature Communications*, 12 (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26021-4>.
  21. Frey P., Rachel S. (2022) Realization of a Discrete Time Crystal on 57 Qubits of a Quantum Computer. *Science Advances*, 8 (9), 7652. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm7652>.

22. Sun L.-H., Ounaies Z., Gao X.-L., Whalen C. A., Yang Z.-G. (2011) Preparation, Characterization, and Modeling of Carbon Nanofiber/Epoxy Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2011, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2011/307589>.
23. Magomedov M. N. (2003) On the Baric Fragmentation of a Crystal. *Physics of the Solid State*, 45 (5), 953–956. <http://doi.org/10.1134/1.1575343>.
24. Arakelian S., Kutrovskaya S., Kucherik A., Osipov A., Povolotckaia A., Povolotskiy A., Manshina A. (2016) Laser-Induced Synthesis of Nanostructured Metal–Carbon Clusters and Complexes. *Optical and Quantum Electronics*, 48 (11), 505. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0776-7>.
25. Cannella C. B., Goldman N. (2015) Carbyne Fiber Synthesis within Evaporating Metallic Liquid Carbon. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119 (37), 21605–21611. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b03781>.
26. Kutrovskaya S. V., Arakelian S. M., Kucherik A. O., Osipov A. V., Garnov S. V. (2019) Long linear Carbon Chain–Laser-Induced Structures and Possible Applications. *Laser Physics*, 29 (8), 085901. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/ab183a>.
27. Kucherik A. O., Arakelian S. M., Garnov S. V., Kutrovskaya S. V., Nogtev D. S., Osipov A. V., Khor’kov K. S. (2016) Two-Stage Laser-Induced Synthesis of Linear Carbon Chains. *Quantum Electronics*, 46 (7), 627–633. <https://doi.org/10.1070/qel16128>.
28. Landau, L. D., Lifshits E. M. (2002) *Theoretical Physics. Vol. V. Statistical Physics*. Part. 1. 5<sup>th</sup> ed. Moscow, Fizmatlit Publ. 616 (in Russian).
29. Tumarkina D. D., Butkovskii O. Ya., Bolachkov A. V., Burtsev A. A. (2023) Surface Topology of Mixing Entropy After Two-Pulse Laser Ablation of Stainless Steel. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klastEROV, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 15, 869–878. <https://doi.org/10.26456/pcascnn/2023.15.869> (in Russian).
30. Belysheva T. V., Gatin A. K., Grishin M. V., Ikim M. I., Matyuk V. M., Sarvadii S. Y., Trakhtenberg L. I., Shub B. R. (2015) Structure and Physicochemical Properties of Nanostructured metal Oxide Films for Use as the Sensitive Layer in Gas Sensors. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 9 (5), 733–742. <https://doi.org/10.1134/S1990793115050048>.
31. Agyngi E., Wakabayashi L., Wiandt T., Maggelakis S. (2018) Eden Model Simulation of Re-Epithelialization and Angiogenesis of an Epidermal Wound. *Processes*, 6 (11), 207. <https://doi.org/10.3390/pr6110207>.
32. Moskalev P. V. (2009) Analysis of the Percolation Cluster Structure. *Technical Physics*, 54 (6), 763–769. <http://doi.org/10.1134/S1063784209060012>.
33. Ryzhikova Yu. V., Ryzhikov S. B. (2018) Fractal Properties of Self-Organizing Dendritic Structures. *Uchebnye Zapiski Fizicheskogo Fakulteta Moskovskogo Universiteta = Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, (5), 1850401-1-1850401-7 (in Russian).
34. Mroczka J., Woźniak M., Onofri F. R. A. (2012) Algorithms and Methods for Analysis of the Optical Structure Factor of Fractal Aggregates. *Metrology and Measurement Systems*, 19 (3), 459–470. <http://doi.org/10.2478/v10178-012-0039-2>.
35. Çağdaş A., Allahverdi Y. (2024) Diffusion Limited Aggregation via Python: Dendritic Structures and Algorithmic Art. *Journal of Scientific Reports-A*, 58, 99–112. <https://doi.org/10.5931/jsr-a.1454389>.
36. Zaitsev D. A. (2017) A Generalized Neighborhood for Cellular Automata. *Theoretical Computer Science*, 666, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
37. Ampilova N. B., Solovyov I. P. (2012) Algorithms for Fractal Image Analysis. *Kompyuternye Instrumenty v Obrazovanii = Computer Tools in Education Journal*, (2), 19–24 (in Russian).
38. Ismagilov R. G. (2022) Electric Field Near a Conductive Tip. *Tekhnologii. Innovatsii. Svyaz': sb. materialov nauchno-prakt. konf.* [Technology. Innovation. Communication: Collection of Materials of the Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, 39–41 (in Russian).