

## Особенности моделирования плазменного синтеза УНС в жидкой среде

Александр Н. Гаврилов<sup>1</sup> [gavivrn@mail.ru](mailto:gavivrn@mail.ru)  0000-0002-0132-4563  
Михаил В. Алексеев<sup>1</sup> [mwa1976@mail.ru](mailto:mwa1976@mail.ru)  0000-0001-7768-8550  
Константин Д. Ильинов<sup>1</sup> [konstantin.iljinov@ya.ru](mailto:konstantin.iljinov@ya.ru)

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Аннотация.** Разработка углеродных наноструктурированных (УНС) материалов для промышленного применения является актуальной задачей, учитывая их широкое использование в различных отраслях. Основной целью исследования было рассмотреть особенности метода плазменного синтеза УНС в жидкой среде и подход определения рациональных параметров технологического процесса. Рассмотрены материалы, получаемые электродуговым методом в жидкой среде, и сама установка синтеза. Показаны существенные отличия синтеза УНС в жидкой среде от использования традиционной газовой буферной среды. Обозначены методы математического моделирования, позволяющие описывать плазменные процессы применительно к рассматриваемому синтезу. Показана целесообразность использования кинетического подхода для моделирования плазменных процессов синтеза УНС в жидкой среде. Использование системы уравнений Больцмана для каждого вида компонента плазмы межэлектродного пространства, дополненных условием парных упругих и неупругих столкновений, позволяет рассматривать процессы движения и взаимодействия частиц. Это дает возможность прогнозировать образование в плазме кластерных групп со связями C–C, C=C формирующих пентагоны и гексагоны, которые образуют архитектуру УНС и определяют количественный выход продукта синтеза. Дополнение модели системой уравнений Максвелла, позволяет описать параметры электромагнитного поля, а использование уравнения теплопроводности Фурье с учетом подвижных границ системы выполнить расчет температурного поля объекта и найти начальные скорости и энергии частиц. Предложенный подход математического моделирования плазменного синтеза, позволяет найти рациональные технологические условия синтеза УНС в жидкой среде, определяющие получение конечного продукта с заданными свойствами и максимальным выходом.

**Ключевые слова:** углеродные наноструктуры, плазма, синтез, жидкая среда, моделирование.

## Features of modeling the plasma synthesis of ONC in a liquid medium

Alexander N. Gavrilov<sup>1</sup> [gavivrn@mail.ru](mailto:gavivrn@mail.ru)  0000-0002-0132-4563  
Mikhail V. Alekseev<sup>1</sup> [mwa1976@mail.ru](mailto:mwa1976@mail.ru)  0000-0001-7768-8550  
Konstantin D. Ilyinov<sup>1</sup> [konstantin.iljinov@ya.ru](mailto:konstantin.iljinov@ya.ru)

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Abstract.** The development of carbon nanostructured (CNS) materials for industrial applications is an urgent task, given their widespread use in various industries. The main purpose of the study was to consider the features of the method of plasma synthesis of CNS in a liquid medium and the approach to determining the rational parameters of the technological process. The materials obtained by the electric arc method in a liquid medium and the synthesis unit itself are considered. Significant differences between the synthesis of CNS in a liquid medium and the use of a traditional gas buffer medium are shown. The methods of mathematical modeling are indicated, which make it possible to describe plasma processes in relation to the synthesis under consideration. The expediency of using a kinetic approach for modeling plasma processes of synthesis of CNS in a liquid medium is shown. The use of a system of Boltzmann equations for each type of plasma component of the interelectrode space, supplemented by the condition of paired elastic and inelastic collisions, allows us to consider the processes of motion and interaction of particles. This makes it possible to predict the formation in plasma of cluster groups with C–C, C=C bonds forming pentagons and hexagons, which form the architecture of the CNS and determine the quantitative yield of the synthesis product. Supplementing the model with a system of Maxwell's equations allows us to describe the parameters of the electromagnetic field, and using the Fourier thermal conductivity equation, taking into account the moving boundaries of the system, to calculate the temperature field of the object and find the initial velocities and energies of particles. The proposed approach of mathematical modeling of plasma synthesis makes it possible to find rational technological conditions for the synthesis of CNS in a liquid medium, which determine the production of the final product with specified properties and maximum yield.

**Keywords:** carbon nanostructures, plasma, synthesis, liquid medium, modeling.

### Введение

Разработка углеродных наноструктурированных (УНС) материалов является одной из актуальных задач современной науки и промышленности. УНС обладают уникальными физико-химическими свойствами, которые делают их востребованными в различных областях, включая электронику, медицину, энергетику и

космическую инженерию. Они служат отличными наполнителями и армирующими материалами для полимерных смол, что позволяет создавать легкие композитные материалы с новыми или улучшенными характеристиками (механическая прочность, электропроводность,

Для цитирования

Гаврилов А.Н., Алексеев М.В., Ильинов К.Д. Особенности моделирования плазменного синтеза УНС в жидкой среде // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 267–273. doi:10.20914/2310-1202-2024-3-267-273

For citation

Gavrilov A.N., Alekseev M.V., Ilyinov K.D. Features of modeling the plasma synthesis of ONC in a liquid medium. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 267–273. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-3-267-273

термоустойчивость и др.). Кроме того, фуллерены используются в смазочных материалах для создания защитных пленок, снижающих трение, что позволяет значительно увеличивать срок службы оборудования. Нанотрубки применяются для хранения энергии, фильтрации воды, тонкопленочной электроники, покрытий стойких к температурным перепадам и механическим повреждениям, а также в производстве чувствительных сенсоров и дисплеев с высокой четкостью изображения [1].

Одним из вопросов промышленного синтеза УНС, является нахождение технологических условий получения, обеспечивающих высокий выход определенных однородных структур. Среди простых методов получения качественных УНС значимую роль играют плазменные методы, основанные на сублимации углерода низкотемпературной плазмой с последующей агрегацией в холодной области [2].

Одним из перспективных методов получения качественного продукта является электродуговой синтез в жидкой среде с использованием катализатора [3]. Данный метод синтеза позволяет получать несколько различных типов УНС: фуллерены; одностенные и многостенные нанотрубки; нановолокна; нанорога; квантовые наноструктуры; окисленный графен и аморфный углерод (рисунок 1).

Получаемые УНС отличаются молекулярной структурой и соответственно свойствами, представляющие интерес для промышленности.

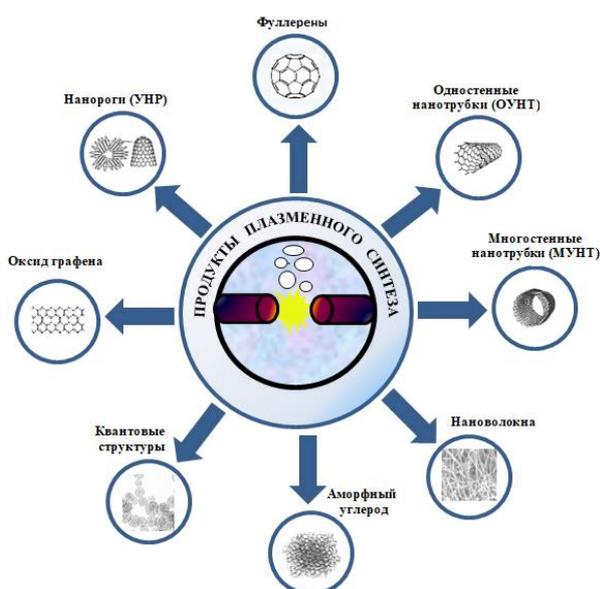


Рисунок 1. Материалы, получаемые электродуговым методом в жидкой среде

Figure 1. Materials produced by electric arc method in liquid medium

Фуллерены олицетворяют собой молекулы, состоящие из атомов углерода, соединенных

в пентагоны и гексагоны ковалентными связями С–С и С = С, число которых четно и может изменяться от 24 и более 600. Наиболее стабильными и соответственно перспективными для использования в промышленности являются фуллерены  $C_{60}$  и  $C_{70}$ . Фуллерен  $C_{70}$ , отличается от  $C_{60}$  вставкой полосы из 10 атомов углерода в экваториальную область  $C_{60}$ , из-за чего молекула  $C_{70}$  оказывается более вытянутой. Фуллерены, содержащие более 70 атомов углерода, имеют более сложный изомерный состав [4].

Одностенные (ОУНТ) и многостенные (МУНТ) углеродные нанотрубки представляют собой вытянутые структуры

Короткая, неправильной формы закрытая углеродная нанотрубка, вершиной которой является наноконус, представляет собой нанорог.

Квантовые наноструктуры – это наночастицы размером от 2 до 10 нм, имеющее высокий квантовый выход фотолюминесценции в обратном направлении излучению.

**Цель работы** – рассмотреть рациональный метод синтеза УНС и возможность оценки влияния технологических условий на него, позволяющих найти условия, обеспечивающие высокий выход и однородность конечного продукта в промышленных масштабах, повысить эффективность процесса.

## Результаты

Предлагаемая установка плазменного синтеза УНС представляет собой камеру, внутри которой создается электродуговой разряд. Для создания дуговой разрядки используются два электрода, на которые подается электрический ток. Катод изготавливается из материала, устойчивого к высоким температурам и коррозии. Анод представляет собой графитовый электрод с высокой степени очистки от различных примесей, содержащий катализатор.

На выход и качество получаемого продукта, влияет множество факторов: катализатор, вид и параметры тока, температура, давление, размеры реакционной камеры, межэлектродное расстояние, скорость движения анода, расположение, соотношение геометрических размеров электродов и др.

Поэтому установка синтеза должна быть оснащена автоматизированной системой контроля и регулирования необходимых технологических параметров: температура жидкой среды в камере, плотность тока межэлектродного разряда, напряжение на электродах, межэлектродное расстояние, что позволяет обеспечивать стабильные условия протекания реакции [5].

Рассматриваемый процесс синтеза УНС начинается с подготовки катализаторной смеси, непосредственно влияющей на выход, форму

и размером наночастиц. Катализатор вводится непосредственно в анодный электрод, размещенный в камере синтеза. На электроды подают напряжение и поддерживают постоянный ток. Плотность поддерживаемого тока зависит от межэлектродного промежутка, параметров электродов и непосредственно влияет на синтезируемые УНС. В межэлектродном пространстве образуется низкотемпературная плазма. При использовании жидкой среды вокруг плазмы дугового разряда создается газообразная среда в виде пузыря. Давление, состав и объем пузыря также влияют на размер формируемых частиц. При этом катод окруженный жидкостью, испытывает интенсивное охлаждение, что существенно влияет на конечный продукт. В условиях высокой температуры, скоростей, давления атомы и ионы реагентов конденсируясь, образуют наночастицы, которые при разных условиях синтеза могут осаждаться на катоде (депозитный осадок) или стенках реакционной камеры давая разный выход и качество.

Схема получения УНС данным способом представлена на рисунке 2.

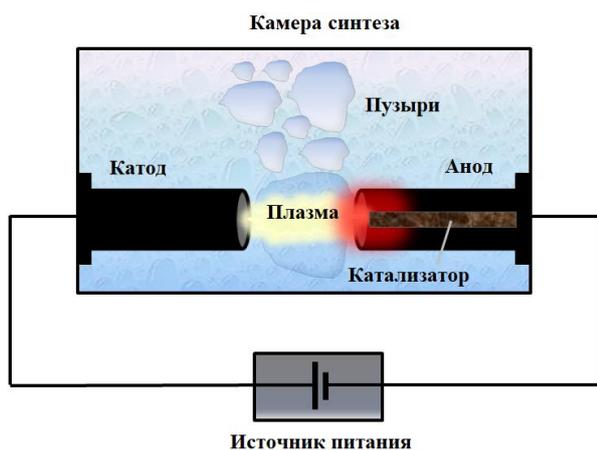


Рисунок 2. Схема получения УНС методом плазменной возгонки графитового сырья в жидкой среде

Figure 2. Scheme for production of CNTs by plasma sublimation of graphite feedstock in liquid medium

Синтезу УНС в жидкой среде присутствуют существенные отличия от использования газовой буферной среды (гелий, аргон и др.):

- межэлектродное расстояние, зона плазмы, а также необходимый ток между электродами в жидкой среде значительно меньше, чем в газовой буферной среде;

- вокруг электрической дуги создается газообразная среда в виде пузыря (при использовании дистиллированной воды пузырьки в основном состоят из паров углерода, водяного пара, водорода и окиси углерода), состав и объем которого влияют на размер синтезируемых

наночастиц, граница раздела газа и жидкости в пузырьке действует как стенка контейнера;

- катод окруженный жидкостью испытывает более интенсивное охлаждение, чем в газовой буферной среде, что увеличивает скорость осаждения образованных в плазме кластерных групп углерода формирующих УНС; быстрое изменение температуры непосредственно влияет на рекомбинацию ионов, присутствующих в канале разряда, а граница раздела газа и жидкости в пузырьке, действует как стенка контейнера.

Технологически синтез УНС на основе возгонки графита плазмой дугового разряда в жидкой среде схож с процессом подводной электродуговой сварки. Однако условия синтеза, использование жидкой среды с низкой удельной электропроводностью (например, дистиллированная вода), протекание процессов в плазме с присутствием среды газообразного пузыря и катализатора, испарение графитового сырья и конденсация углеродных кластеров, существенно отличают данный метод от процессов сварки [6].

Нахождение условий проведения такого процесса экспериментальными исследованиями малоэффективно и затруднительно. Поэтому для определения рациональных технологических параметров синтеза необходимо использовать методы имитационного моделирования процессов.

Применение фундаментальных законов физики и химии для моделирования процессов, осложнено тем, что в плазме происходит одновременно множество взаимодействующих фазовых и структурных переходов с определенными особенностями, разделить которые зачастую невозможно. Поэтому для описания использовать существующие модели не представляется возможным.

Математическое моделирование таких процессов является сложной ресурсоемкой задачей. Для этого, возможно использовать подходы разных уровней иерархической детализации компонентов, дающих разную точностью описания объекта. Методы, позволяющие описать плазменные процессы, представлены на рисунке 3.

Обозначенные методы математического моделирования процессов получения УНС условно можно разделить на классические, полуклассические и квантово-механические. Они отличаются помимо степени детализации и точности описания объекта, также возможностями учета специфики физических процессов, происходящих в плазме (движение, столкновение, взаимодействие частиц) и вычислительными затратами необходимыми для численного решения задачи [7].

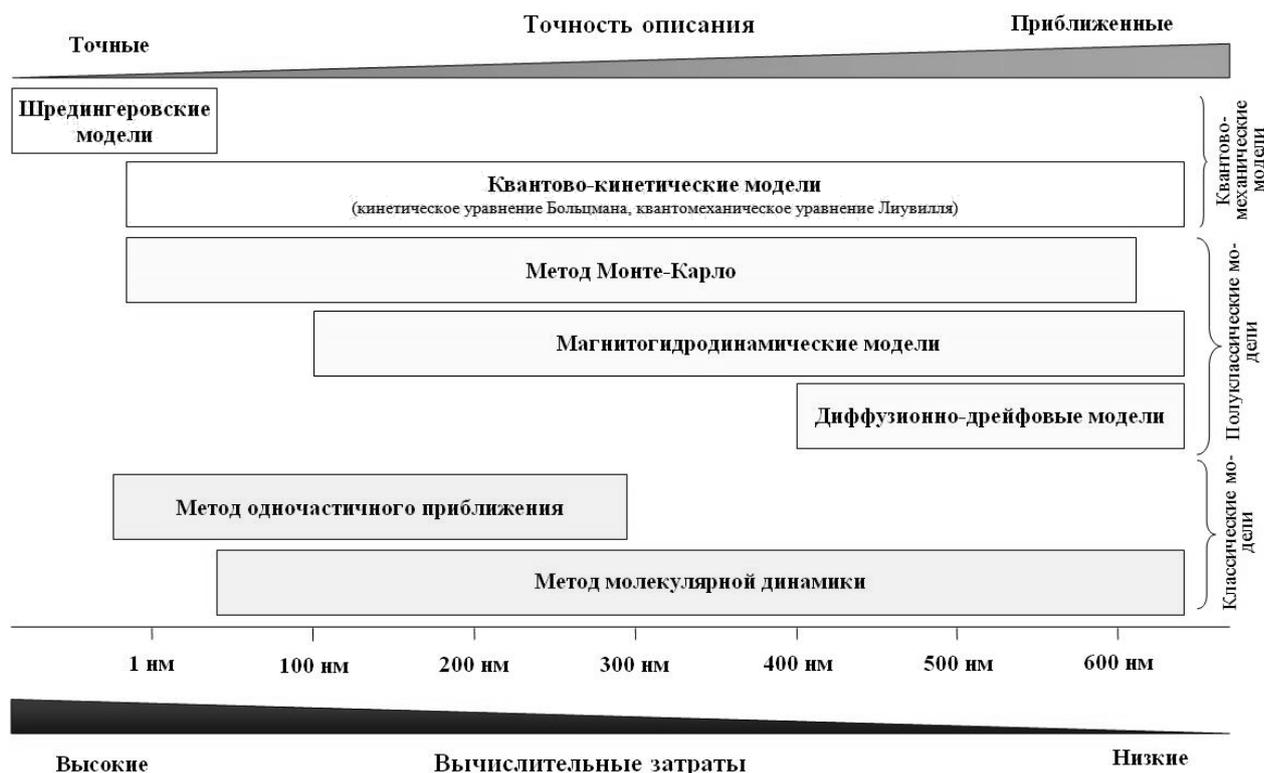


Рисунок 3. Методы математического моделирования процессов синтеза УНС

Figure 3. Methods of mathematical modeling of CNS synthesis processes

Классическим моделям требуются малые вычислительные затраты, однако они обеспечивают низкую точность математического описания объекта и не позволяют детализировано рассматривать процессы взаимодействия в плазме. Полуклассические модели обеспечивают приемлемый компромисс между вычислительными затратами и точностью описания физических явлений, но не дают возможность исследовать процессы на атомном уровне, которые необходимы для понимания формирования УНС в плазме. Использование квантомеханического подхода, обеспечивает высокую точность описания нужных событий в плазме, но создает сложности в построении модели и требует очень больших вычислительных затрат при численном решении [8, 9].

Наиболее подходят для моделирования динамики низкотемпературной плазмы применительно к рассматриваемому синтезу УНС два подхода разных уровней детализации:

- магнитогидродинамическая (МГД) теория (рассматривающая плазму как проводящую жидкость, обладающая особыми свойствами);
- кинетическая теория (оперирующая с функцией распределения заряженных частиц по координатам и импульсам) [10].

Условием применимости МГД описания является редкая плазма, в которой нет влияния заряженных частиц друг на друга, не учитываются

их столкновения, то есть при расчете движения заряженных частиц рассматриваются только внешние электромагнитные поля, которые не зависят от потоков заряженных частиц.

Применительно к методу плазменного синтеза УНС в жидкой среде для описания процессов движения и взаимодействия частиц целесообразно использовать квантово-кинетические модели. Именно они позволяют описывать процессы зарождения и роста кластерных групп углерода формирующих УНС в плазме в большом диапазоне линейных размеров, а также получить более простые модели, например, по сравнению с шредингеровскими.

В рассматриваемой анизотропной плазме дугового разряда происходит одновременное движение и взаимодействие различных частиц (электронов, ионов углерода, катализатора, среды), зарождение и рост кластерных групп со связями C–C, C = C, C = C–C формирующих УНС на основе упругих и неупругих столкновений частиц,

Непосредственно на кинетику происходящих явлений в плазме влияют электромагнитные процессы, среда, катализатор. Происходит изменение конфигурации рабочей зоны, связанной с разрушением исходного графитового сырья и ростом депозита на основе процессов тепло и массообмена.

Поэтому для построения модели такой сложной задачи, можно применить кинетический подход, использующий систему уравнение Больцмана для каждого вида частиц плазмы, дополненная условием парных столкновений между частицами.

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{g} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} - \frac{q_\alpha}{m_\alpha} (\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{g}, \vec{B}]) \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{g}} = \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \Big|_{CT} \quad (1)$$

где  $f_\alpha$  – функция распределения компонентов плазмы;  $\alpha = e, c, h, s$  – тип частицы в плазме ( $e$  – электрон,  $c$  – углерод,  $h$  – газ пузыря,  $s$  – катализатор);  $\vec{r}$  – координаты частиц;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля;  $\vec{B}$  – магнитная индукция;  $\vec{g}$  – поле скоростей частиц;  $q_\alpha, m_\alpha$  – заряд и масса частицы.

Оператор столкновений в правой части уравнения (1) представляет собой сумму интегралов парных столкновений частиц друг с другом в виде:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \Big|_{CT} = \sum_{k=e,c,h,s} \iint_V (f'_\alpha f'_k - f_\alpha f_k) |\vec{g} - \vec{g}'| d\sigma d\vec{g}', \quad (2)$$

где  $f, f'$  – функции распределения частиц до столкновения и после столкновения;  $\vec{g}, \vec{g}'$  – скорости частиц до и после столкновения;  $d\sigma = 4R_1 R_2 \cos \theta d\Omega$  – дифференциальное эффективное поперечное сечение рассеяния частиц с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  на телесный угол  $d\Omega$ ;  $\theta$  – угол между вектором скорости сталкивающихся частиц и линией движения,  $V$  – объем области плазмы.

Интеграл столкновений (2) учитывает все компоненты плазмы, взаимодействующие друг с другом. Он дополняется условиями упругих и неупругих парных столкновений между частицами. При неупругом столкновении частиц углерода, происходит преобразование энергии, и создаются энергетические условия образования ковалентных связей C–C, C = C формирующих кластерные группы.

Для нахождения параметров электромагнитного поля уравнения Больцмана (1) необходимо дополнить системой уравнений Максвелла, описывающей самосогласованное электрическое поле.

Процессы при электродуговом синтезе УНС относятся к высокотемпературным технологическим процессам, при которых температура плазмы, нагрев и охлаждение электродов оказывают прямое влияние на качество продукта в целом [11–20]. Поэтому в основу модели теплообмена применительно для рассматриваемого

процесса должна быть положена общая теория теплопроводности с определенными граничными условиями. Проведенный анализ процесса электродугового синтеза УНС позволил выделить основные способы передачи тепла в рассматриваемой системе в плазме – теплопроводность и конвекция, излучением можно пренебречь вследствие незначительного влияния на процесс. Использование уравнений теплопроводности Фурье с учетом подвижных границ позволяет выполнить расчет температурного поля и найти начальные скорости и энергии частиц.

Наличие огромного числа взаимодействующих и движущихся частиц в плазме, требует дополнительной разработки специальных эффективных численных методов обработки больших объемов данных с использованием параллельных вычислений, необходимых для расчетов параметров процессов такой математической модели.

### Заключение

Нахождение рациональных технологических условий синтеза УНС в жидкой среде, позволяющих получать конечный продукт с заданными свойствами и максимальным выходом возможно на основе предварительного математического моделирования процесса.

Разработка математической модели с учетом значительного количества факторов, влияющих на синтез, является сложной ресурсоемкой задачей.

Рассмотренные в работе возможные методы описания процессов, происходящих в низкотемпературной плазме, позволили сделать вывод о целесообразности использования кинетического подхода для описания рассмотренного плазменного синтеза УНС в жидкой среде. Использование уравнения Больцмана для описания каждого вида компонента плазмы, с учетом парных упругих и неупругих взаимодействий между частицами, позволяет рассматривать процессы их движения и взаимодействия. Это позволяет прогнозировать образование в плазме кластерных групп со связями C–C, C = C формирующих пентагоны и гексагоны, которые образуют архитектуру УНС и определяют количественный выход синтезируемого продукта.

Для описания параметров электромагнитного поля дугевого разряда в модели необходимо использовать уравнения Максвелла, описывающих самосогласованное поле.

Использование дополнительно уравнения теплопроводности Фурье с учетом подвижных границ системы катод-плазма-анод позволит выполнить расчет температурного поля рассматриваемого объекта и найти начальные скорости и энергии частиц.

## Литература

- 1 Thiruvengadathan R., Sundriyal P., Roy S.C., Bhattacharya S. Carbon Nanostructures: Fundamentals to Applications // AIP Publishing, 2021. P. 1-14. doi: 10.1063/9780735423114
- 2 Бидилдаева А.А., Мышырова Ж.К., Тасимханова А.Т., Агасиева С.В. Перспективные методы синтеза углеродных нанотрубок // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. 2021. Т. 13. № 1. С. 36-47. doi: 10.18127/j22250980-202101-03
- 3 Бураков В.С., Невар Е.А., Неделько М.И., Тарасенко Н.В. Синтез и модификация наночастиц молекулярных соединений в плазме электрических разрядов в жидкости // Российский химический журнал. 2013. Т. 57. № 3-4. С. 17-30.
- 4 Холодова О.М., Пруцакова Н.В., Жданова Т.П., Лаврентьев А.А. и др. Изучение из первых принципов атомной и электронной структуры в гибридных системах графен-фуллерен // Письма о материалах. 2020. Т. 10. № 4 (40). С. 365-370. doi: 10.22226/2410-3535-2020-4-365-370
- 5 Chao-Mujica F.J., Hernández L.G., Camacho-López S., Camacho M. Carbon quantum dots by submerged arc discharge in water: Synthesis, characterization, and mechanism of formation // Journal of Applied Physics. 2021. V. 129. № 16. P. 163301. doi:10.1063/5.0040322
- 6 Никулин В.Е., Паршин С.Г., Кархин В.А., Левченко А.М. и др. Исследование термических циклов и упрочнения зоны термического влияния при подводной мокрой сварке судостроительной стали // Сварка и диагностика. 2024. № 2. С. 18-23. doi: 10.52177/2071-5234
- 7 Abramov G.V., Gavrilov A.N. Modeling of carbon nanostructures synthesis in low-temperature plasma // Advanced Materials & Technologies. 2019. №1. С. 21-34. doi: 10.17277/amt.2019.01.pp.021-034
- 8 Гришин Ю.М., Мяо Л. Численное моделирование процесса испарения монодисперсных кварцевых частиц в потоке аргоновой плазмы индукционного плазматрона // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58. № 1. С. 3-14. doi: 10.31857/S004036442001007X
- 9 Банковский А.С., Захаров А.А., Потапов А.А. Моделирование баланса электронов и пространственного заряда в газоразрядной плазме // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 11. С. 67-70. doi: 10.52348/2712-8873\_MMТТ\_2021\_11\_67
- 10 Гаврилов А.Н., Суханова Н.В., Рылев С.С. Кинетический подход построения модели плазменных процессов синтеза углеродных наноструктур // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 862-868. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-862-868
- 11 Шавелкина М.Б., Иванов П.П., Амиров Р.Х., Бочаров А.Н. Влияние профиля температур на состав конденсированного углерода в плазменной струе // Журнал структурной химии 2020. Т. 61. № 4. С. 623-630. doi: 10.26902/JSC\_id54019
- 12 Saito G., Akiyama T. Nanomaterial synthesis using plasma generation in liquid // Journal of nanomaterials. 2015. V. 2015. № 1. P. 123696.
- 13 Aissou T. et al. Controlling carbon nanostructure synthesis in thermal plasma jet: Correlation of process parameters, plasma characteristics, and product morphology // Carbon. 2024. V. 217. P. 118605.
- 14 Pashova K. et al. Graphene synthesis by microwave plasma chemical vapor deposition: Analysis of the emission spectra and modeling // Plasma Sources Science and Technology. 2019. V. 28. № 4. P. 045001.
- 15 Saifutdinov A., Timerkaev B. Modeling and comparative analysis of atmospheric pressure anodic carbon arc discharge in argon and helium—producing carbon nanostructures // Nanomaterials. 2023. V. 13. № 13. P. 1966.
- 16 Bulychev N.A. Obtaining of gaseous hydrogen and solid carbon nanoparticles by pyrolysis of liquid-phase media in low-temperature plasma // International Journal of Hydrogen Energy. 2021. V. 46. № 76. P. 37768-37773.
- 17 Gerasimenko A.Y. et al. Hybrid carbon nanotubes—graphene nanostructures: Modeling, formation, characterization // Nanomaterials. 2022. V. 12. № 16. P. 2812.
- 18 Napalkov O.G. et al. Simulation of the Carbon Synthesis Process in Atmospheric-Pressure Microwave Discharge in an Argon–Ethanol Gas Mixture // High Energy Chemistry. 2021. V. 55. P. 525-530.
- 19 Law V.J., Dowling D.P. Application of microwave oven plasma reactors for the formation of carbon-based nanomaterials // 13th Chaotic Modeling and Simulation International Conference 13. Springer International Publishing, 2021. P. 467-486.
- 20 Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review // Diamond and related materials. 2014. V. 50. P. 135-150.

## References

- 1 Thiruvengadathan R., Sundriyal P., Roy S.C., Bhattacharya S. Carbon Nanostructures: Fundamentals to Applications. AIP Publishing. pp. 1-14. doi: 10.1063/9780735423114
- 2 Bidildaeva A.A., Myshyrova Zh.K., Yessimkhanova A.T., Agasieva S.V. Promising methods for the synthesis of carbon nanotubes. Nanotechnology: development, application - XXI century. 2021. vol. 13. no. 1. pp. 36-47. doi: 10.18127/j22250980-202101-03 (in Russian).
- 3 Burakov V.S., Nevers E.A., Nedelko M.I., Tarasenko N.V. Synthesis and modification of nanoparticles of molecular compounds in plasma of electric discharges in liquid. Russian Chemical Journal. 2013. vol. 57. no. 3-4. pp. 17-30. (in Russian).
- 4 Kholodova O.M., Prutsakova N.V., Zhdanova T.P., Lavrentiev A.A. et al. The study of the first principles of atomic and electronic structure in hybrid graphene-fullerene systems. Letters on Materials. 2020. vol. 10. no. 4 (40). pp. 365-370. doi: 10.22226/2410-3535-2020-4-365-370 (in Russian).
- 5 Chao-Mujica F.J., Hernández L.G., Camacho-López S., Camacho M. Carbon quantum dots by submerged arc discharge in water: Synthesis, characterization, and mechanism of formation. Journal of Applied Physics. 2021. vol. 129. no. 16. pp. 163301. doi: 10.1063/5.0040322 (in Russian).
- 6 Nikulin V.E., Parshin S.G., Karkhin V.A., Levchenko A.M. et al. Investigation of thermal cycles and hardening of the zone of thermal influence during underwater wet welding of shipbuilding steel. Welding and diagnostics. 2024. no. 2. pp. 18-23. doi: 10.52177/2071-5234 (in Russian).

- 7 Abramov G.V., Gavrilov A.N. Modeling of carbon nanostructures synthesis in low-temperature plasma. *Advanced Materials & Technologies*. 2019. no. 1. pp. 21-34. doi: 10.17277/amt.2019.01.pp.021-034 (in Russian).
- 8 Grishin Yu.M., Mo L. Numerical simulation of the evaporation process of monodisperse quartz particles in the argon plasma stream of an induction plasma torch. *Thermophysics of high temperatures*. 2020. vol. 58. no. 1. pp. 3-14. doi: 10.31857/S004036442001007X (in Russian).
- 9 Bankovskiy A.S., Zakharov A.A., Potapov A.A. Modeling of the balance of electrons and spatial charge in a gas-discharge plasma. *Mathematical methods in technologies and engineering*. 2021. no. 11. pp. 67-70. doi: 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2021\_11\_67 (in Russian).
- 10 Gavrilov A.N., Sukhanova N.V., Pylev S.S. Kinetic approach to constructing a model of plasma processes for the synthesis of carbon nanostructures. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, mechanics and Optics*. 2019. vol. 19. no. 5. pp. 862-868. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-862-868 (in Russian).
- 11 Shavelkina M.B., Ivanov P.P., Amirov R.X., Bocharov A.N. Influence of the temperature profile on the composition of condensed carbon in a plasma jet. *Journal of Structural Chemistry* 2020. vol. 61. no. 4. pp. 623-630. doi: 10.26902/JSC\_id54019 (in Russian).
- 12 Saito G., Akiyama T. Nanomaterial synthesis using plasma generation in liquid. *Journal of nanomaterials*. 2015. vol. 2015. no. 1. pp. 123696.
- 13 Aissou T. et al. Controlling carbon nanostructure synthesis in thermal plasma jet: Correlation of process parameters, plasma characteristics, and product morphology. *Carbon*. 2024. vol. 217. pp. 118605.
- 14 Pashova K. et al. Graphene synthesis by microwave plasma chemical vapor deposition: Analysis of the emission spectra and modeling. *Plasma Sources Science and Technology*. 2019. vol. 28. no. 4. pp. 045001.
- 15 Saifutdinov A., Timerkaev B. Modeling and comparative analysis of atmospheric pressure anodic carbon arc discharge in argon and helium—producing carbon nanostructures. *Nanomaterials*. 2023. vol. 13. no. 13. pp. 1966.
- 16 Bulychev N.A. Obtaining of gaseous hydrogen and solid carbon nanoparticles by pyrolysis of liquid-phase media in low-temperature plasma. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. vol. 46. no. 76. pp. 37768-37773.
- 17 Gerasimenko A.Y. et al. Hybrid carbon nanotubes–graphene nanostructures: Modeling, formation, characterization. *Nanomaterials*. 2022. vol. 12. no. 16. pp. 2812.
- 18 Napalkov O.G. et al. Simulation of the Carbon Synthesis Process in Atmospheric-Pressure Microwave Discharge in an Argon–Ethanol Gas Mixture. *High Energy Chemistry*. 2021. vol. 55. pp. 525-530.
- 19 Law V.J., Dowling D.P. Application of microwave oven plasma reactors for the formation of carbon-based nanomaterials. *13th Chaotic Modeling and Simulation International Conference* 13. Springer International Publishing, 2021. pp. 467-486.
- 20 Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review. *Diamond and related materials*. 2014. vol. 50. pp. 135-150.

#### Сведения об авторах

**Александр Н. Гаврилов** д.т.н., профессор, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ganivrn@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0132-4563>

**Михаил В. Алексеев** к.т.н., доцент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mwa1976@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7768-8550>

**Константин Д. Ильинов** студент, кафедра автоматизированных систем управления процессами и производствами, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, индекс, г. Воронеж, 394036, Россия, konstantin.iljinov@ya.ru

#### Information about authors

**Alexander N. Gavrilov** Dr. Sci. (Engin.), professor, automated control systems for processes and productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ganivrn@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0132-4563>

**Mikhail V. Alekseev** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, automated control systems for processes and productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, mwa1976@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7768-8550>

**Konstantin D. Ilyinov** student, engineer, automated control systems for processes and productions department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, konstantin.iljinov@ya.ru

#### Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 19/07/2024

После редакции 09/08/2024

Принята в печать 30/08/2024

Received 19/07/2024

Accepted in revised 09/08/2024

Accepted 30/08/2024