
ФИЗИКА

PHYSICS

Оригинальная статья / Original article

УДК 538.91

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-54-66>



Деградация молекулярных газов на пористых композиционных наноструктурах CNPs/CuO

Ней Вин Аунг¹, М.А. Пугачевский¹✉

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

✉ e-mail: pmaximal@mail.ru

Резюме

Цель. Исследование электрокаталитической активности пористых композиционных нанопленок CNPs/CuO, обуславливающей деградацию молекулярных газов.

Методы исследования включали использование специально разработанной экспериментальной установки, состоящей из стеклянной камеры с замкнутым циклом продувки воздуха, нагнетателя для создания постоянного воздушного потока, а также воздушного фильтра с композиционными электрокаталитическими нанопленками. В ходе эксперимента в камеру капельным методом вносились изопропиловый спирт и бутилацетат. Пары этих веществ, испаряясь под действием воздушного потока, проходили через композитный фильтр. Эффективность деградации летучих органических соединений фиксировалась в реальном времени с помощью газового сенсора, а в отдельных сериях опытов дополнительно проводился ИК-Фурье спектральный анализ для более подробного изучения процессов, протекающих в системе.

Результаты исследования демонстрируют высокую эффективность электрокаталитического разложения летучих органических соединений на композиционных покрытиях CNPs/CuO. Приложенная электрическая напряженность инициирует образование электрон-дырочных пар, которые, взаимодействуя с молекулами воды и кислорода, генерируют активные формы кислорода ($\cdot\text{OH}$, O_2), обеспечивающие полную минерализацию изопропилового спирта и бутилацетата до CO_2 и H_2O . С помощью ИК-Фурье-спектроскопии зафиксировано отсутствие характеристических полос поглощения исходных соединений и появление сигналов продуктов реакции.

Заключение. Согласно результатам ИК-Фурье-спектроскопии, прохождение высокомолекулярных газов, таких как изопропиловый спирт и бутилацетат, сквозь воздушный фильтр с композиционными пленками CNPs/CuO с приложенным электрическим напряжением (9В, 17В), приводит к их полному разложению на CO_2 и H_2O за счет электрокаталитических процессов, протекающих на поверхности синтезированных пленок.

Ключевые слова: электрокаталитическое разложение; композиционные наноматериалы; оксид меди; углеродные наночастицы; изопропиловый спирт; бутилацетат.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (с/о № 075-03-2025-526) и в рамках Программы «Приоритет 2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213).

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

© Ней Вин Аунг, Пугачевский М.А., 2025

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии /
Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2025;15(3):54–66

Degradation of molecular gases on porous CNPs/CuO composite nanostructures

Nay Win Aung¹, Maksim A. Pugachevskii¹✉

¹ Southwest State University
50 let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: pmaximal@mail.ru

Abstract

Purpose. Study of electrocatalytic activity of porous composite nanofilms CNPs/CuO, causing degradation of molecular gases.

Methods. The research methods included the use of a specially designed experimental setup consisting of a glass chamber with a closed-loop air flow system, a blower to generate a constant air flow, and an air filter with composite electrocatalytic nanofilms. During the experiment, isopropyl alcohol and butyl acetate were added dropwise to the chamber. The vapors of these substances, evaporating under the influence of the air flow, passed through the composite filter. The degradation efficiency of volatile organic compounds was recorded in real time using a gas sensor, and in certain series of experiments, Fourier transform infrared (FTIR) spectral analysis was additionally performed to study the processes occurring in the system in more detail.

The study results demonstrate the high efficiency of the electrocatalytic decomposition of volatile organic compounds on CNPs/CuO composite coatings. Applied electrical voltage initiates the formation of electron-hole pairs, which, by interacting with water and oxygen molecules, generate reactive oxygen species (OH , O_2^-), ensuring the complete mineralization of isopropyl alcohol and butyl acetate to CO_2 and H_2O . Fourier transform IR spectroscopy revealed the absence of characteristic absorption bands of the starting compounds and the appearance of signals from the reaction products.

Conclusion. According to the results of FTIR spectroscopy, the passage of high-molecular gases such as isopropyl alcohol and butyl acetate through an air filter with CNPs/CuO composite films with applied electric voltage (9V, 17V) leads to their complete decomposition into CO_2 and H_2O due to electrocatalytic processes occurring on the surface of the synthesized films.

Keywords: electrocatalytic decomposition; composite nanomaterials; copper oxide; carbon nanoparticles; isopropyl alcohol; butyl acetate.

Funding: The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (contract No. 075-03-2025-526) and within the framework of the Priority 2030 Program (Agreement No. 075-15-2021-1213).

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

For citation: Nay Win Aung, Pugachevskii M.A. Degradation of molecular gases on porous CNPs/CuO composite nanostructures. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Серия: Техника и технологии = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(3):54–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-54-66>.

Received 14.08.2025

Accepted 02.09.2025

Published 30.09.2025

Введение

В последние десятилетия гибридные материалы на основе оксида меди (CuO) и углеродных наноструктур, таких как углеродные нанотрубки (УНТ), графен и углеродные квантовые точки, привлекли внимание исследователей благодаря своей высокой эффективности в процессах разложения летучих органических соединений (ЛОС). Это уникальное сочетание свойств обусловлено несколькими факторами: высокой окислительно-восстановительной способностью CuO из-за переходов $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$, а также выраженной электронной проводимостью и развитой поверхностью углеродных носителей, которая может достигать $1500 \text{ м}^2/\text{г}$. Эти характеристики, в свою очередь, могут быть дополнены плазмоно-усиленным катализом в видимом световом диапазоне, что существенно увеличивает эффективность процессов деградации ЛОС, сульфидом кадмия с MOF-покрытием [1], нанокомпозитом CNTs/ CuO , полученным методом гидротермального синтеза [2], $\text{TiO}_2-\text{CuO}@\text{GO}$ бионанокомпозитом [3].

Современные исследования, например, очистки сточных вод от органических загрязнителей La_2O_3 нанокомпозитом CuO [4] и наночастицами Cu , покрытыми Cu_2O [5], показывают, что гибридные катализаторы на основе наночастиц CuO и углеродных нанотрубок (УНТ) обладают высокой эффективностью в деградации бутилацетата и изопропилового спирта при температурах $180\text{--}250^\circ\text{C}$, достигая конверсии 90–98%. Основными механизмами синергизма являются: выдающиеся электрон-транспортные свойства УНТ, которые способствуют быстрому переносу электронов к активным центрам CuO и стабилизируют промежуточные продукты; окислительно-восстановительные циклы $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$, приводящие к образованию активных радикалов, таких как $\bullet\text{O}_2^-$ и

$\bullet\text{OH}$, способствующих деградации органических соединений; а также особенности структуры композита, обеспечивающие высокую удельную поверхность ($680 \text{ м}^2/\text{г}$ против $45 \text{ м}^2/\text{г}$ для чистого CuO) и сниженную энергию активации (52 кДж/моль по сравнению с 78 кДж/моль для CuO), что дает кинетическое преимущество, ускоряет реакции в фотокаталитической деградации метиленового синего [6] и в фотокаталитическом селективном окислении ароматических спиртов в ароматические альдегиды [7], а также увеличивает антибактериальную активность нанокомпозита CuS с углеродными квантовыми точками [8].

Потенциальное применение этих технологий охватывает широкий спектр областей, включая промышленную очистку (срок службы катализаторов до 8000 часов, экономия энергии до 40% по сравнению с TiO_2), высокочувствительные сенсоры (с порогом обнаружения $10^{-4}\%$ и временем отклика менее 15 с) и медицинские воздухоочистители. Перспективы исследований новой генерации каталитических систем связаны с разработкой мембранных реакторов с фотокаталитическими покрытиями для «умных» материалов и экономичных методов синтеза, которые могут снизить стоимость на 30–50% для фотокаталитического разложения органических красителей [9], бензола и толуола [10].

Ключевое уравнение, описывающее динамику разложения, имеет вид $\ln(\text{Co/C}) = kt$, где $k = 0,12 \text{ мин}^{-1}$ (при 220°C) для бутилацетата. Эти технологии уже нашли применение в автомобильных катализаторах и фармацевтике, а будущие исследования будут направлены на повышение селективности процессов разложения (до 99%) и устойчивости катализаторов к ядам. Таким образом, изучение и оптимизация гибридных катализаторов на основе CuO и углеродных наноструктур

представляют собой актуальное направление для развития технологий очистки окружающей среды и создания эффективных устройств на их основе, таких как электрокатализаторы [11], катализаторы для производства зеленого водорода путем расщепления воды [12], компоненты для солнечных батарей [13]. В данном исследовании композиционные наноструктуры CNPs/CuO были синтезированы методом электрофоретического осаждения в постоянном электрическом поле. Для анализа газофазных соединений использовались датчики качества воздуха и ИК-Фурье-спектрометр, что позволило исследовать процесс разложения молекулярных газов на синтезированных наноструктурах. В работе изучено разложение летучих органических соединений, включая изопропиловый спирт и бутилацетат, на композиционных нанопленках при различных значениях приложенного напряжения.

В данной работе осуществляется исследование процесса деградации молекулярных газов на композиционных наноструктурах CNPs/CuO при различных напряжениях 0, 9 и 17 В.

Материалы и методы

Исследовано влияние электрокатализических процессов, протекающих на синтезированных композитных пленках, при фильтрации молекулярных газов, включая изопропиловый спирт ($(CH_3)_2CHOH$) и бутилацетат ($C_6H_{12}O_2$). Для проведения экспериментов разработана специализированная установка, состоящая из герметичной стеклянной камеры с замкнутой системой циркуляции воздуха, воздушного насоса, фильтрующего элемента с композиционными покрытиями [14], а также газового сенсора и измерительной ячейки ИК-Фурье-спектрометра. Жидкие пробы реагентов вводились капельным методом в замкнутую систему, где при испарении образовывались пары, которые под действием воздушного потока от нагнетателя проходили через фильтрующий материал. Мониторинг процесса осуществлялся с помощью прецизионного датчика качества воздуха (AGS02MA), регистрирующего изменение концентрации газов в реальном времени.

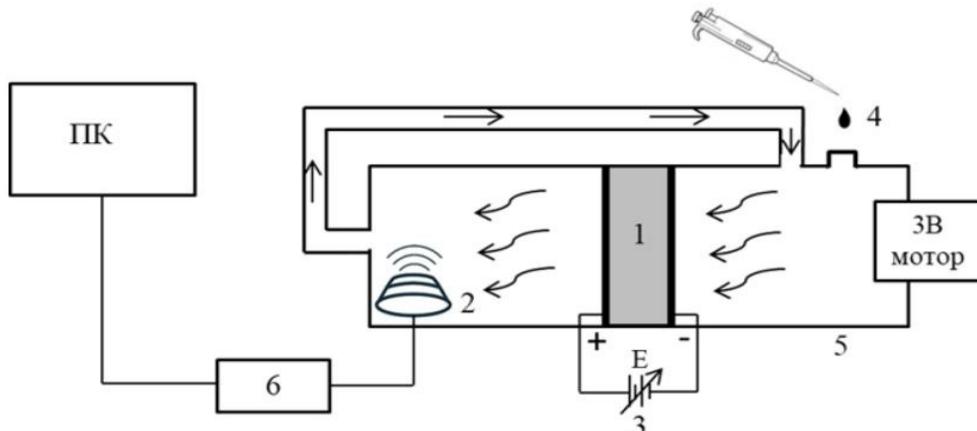


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования каталитической деградации газов на композиционных наноструктурах CNPs/CuO: 1 – композитные пленки на воздушном фильтре; 2 – газовый датчик; 3 – датчик качества воздуха ($E = 0$ В; 9 В; 17 В); 4 – изопропиловый спирт, бутилацетат; 5 – расход газа в закрытой системе; 6 – модуль интерфейса АЦП на основе Ардуино

Fig. 1. Block diagram of the experimental setup for studying the catalytic decomposition of gases on CNPs/CuO nanocomposite structures: 1 – composite films on the air filter; 2 – gas sensor; 3 – air quality sensor ($E = 0$ V; 9 V; 17 V); 4 – isopropyl alcohol, butyl acetate; 5 – gas flow rate in a closed system; 6 – Arduino-based ADC interface module

Процесс деградации молекулярных газов контролировался с помощью датчика качества воздуха AGS02MA (промышленный MEMS-сенсор ASAIR для измерения TVOC) и анализировался методом ИК-Фурье-спектроскопии для оценки эффективности деградации. В блок-схеме, представленной на рисунке 1, показана установка, применяемая для изучения степени деградации молекулярных газов на фильтре с композиционными нанопленками.

В ходе эксперимента капля изопропилового спирта и бутилацетата помещалась

в сосуд и выдерживалась в течение 60 мин. По мере испарения капли пары газа с помощью вентилятора направлялись на композиционные нанопленки, расположенные на фильтре. Деградация молекул газа регистрировалась с помощью датчика качества воздуха при различных значениях напряжения (0, 9, 17 В), а результаты выводились на экран компьютера. Кроме того, деградация молекулярных газов на фильтре из композиционных нанопленок CNPs/CuO также исследовалась с использованием ИК-Фурье-спектрометра с газовой ячейкой (рис. 2).

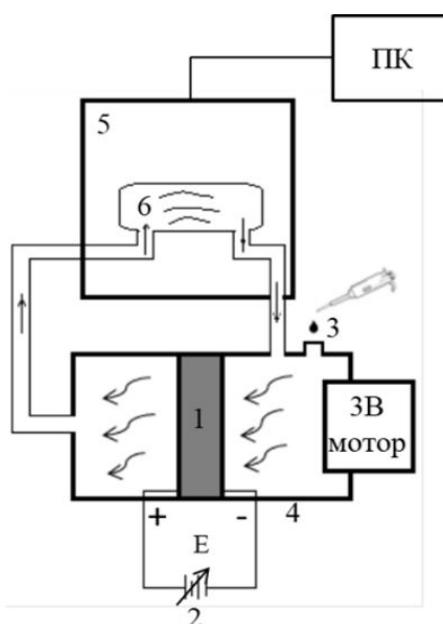


Рис. 2. Блок-схема установки для измерения разложения молекул газа на композиционных наноструктурах методом ИК-Фурье-спектроскопии: 1 – композитные пленки на воздушном фильтре; 2 – датчик качества воздуха ($E = 0$ В; 9 В; 17 В); 3 – изопропиловый спирт, бутилацетат; 4 – расход газа в закрытой системе; 5 – ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье; 6 – газовая кювета

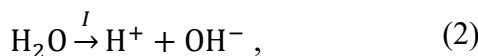
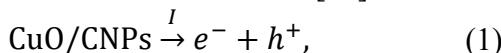
Fig. 2. Block diagram of the setup for measuring the decomposition of gas molecules on nanocomposite structures using IR Fourier spectroscopy: 1 – composite films on the air filter; 2 – air quality sensor ($E = 0$ V; 9 V; 17 V); 3 – isopropyl alcohol, butyl acetate; 4 – gas flow rate in a closed system; 5 – Fourier transform IR spectroscopy; 6 – gas cuvette

Результаты и их обсуждение

В процессе электрокатализа приложенное напряжение приводит к образованию электрон-дырочных пар в композитной пленке. Эти пары, взаимодействуя с растворенными в воздухе молекулами

воды и кислорода, формируют активные формы кислорода, такие как $\cdot\text{OH}$ и O_2^- , которые способны разрушать органические соединения. Их эффективная деградация идет, например, с применением CuONCs [15], додированных никелем нанокатализаторов феррита кобальта [16], гибридных

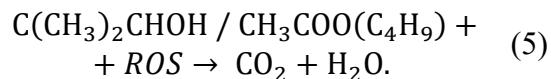
полупроводниковых наноматериалов [17], нанокомпозитов PVA-CuO [18]:



Проведенное исследование с использованием ИК-Фурье-спектрометрии подтвердило деградацию изопропилового спирта ($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) и бутилацетата ($\text{CH}_3\text{COO}(\text{C}_4\text{H}_9)$) до CO_2 и паров воды.

Проходя через воздушную ячейку ИК-Фурье-спектрометра, газовые продукты проанализированы и установлены

продукты конверсии по инфракрасным полосам поглощения CO_2 (дуплеты при 2363 см^{-1} и 2340 см^{-1}) и паров воды ($4000\text{--}3500 \text{ см}^{-1}$, $2000\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$). Эти продукты могут образовываться в результате следующей реакции:



На рисунке 3 представлены спектры ИК-Фурье, иллюстрирующие процесс разложения паров изопропилового спирта ($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) на композитных материалах на основе оксида меди и углеродных наноструктур под воздействием внешнего электрического поля различной напряженности.

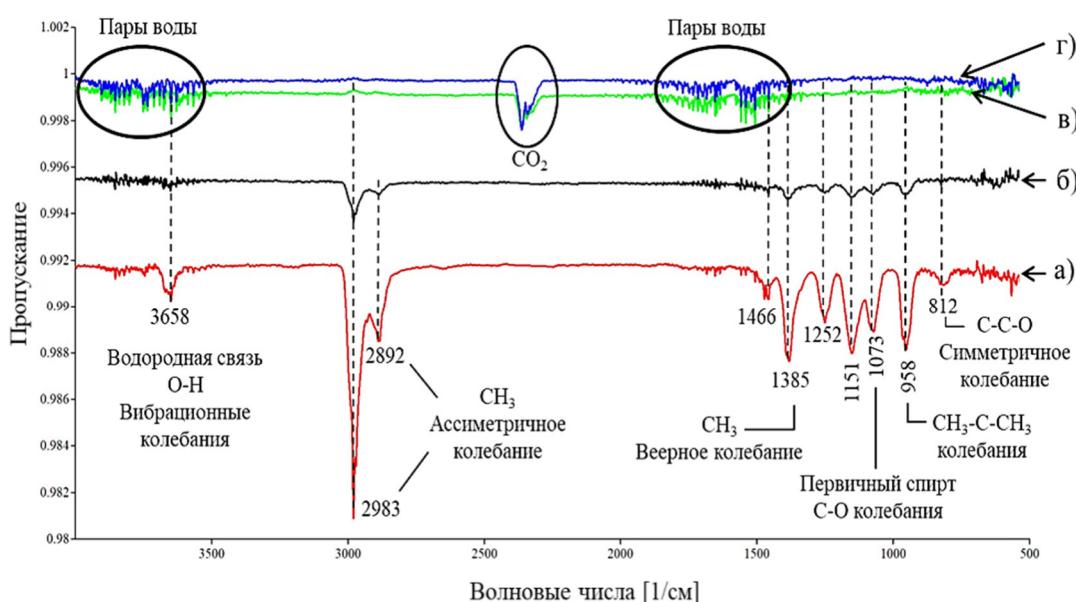


Рис. 3. Результаты ИК-Фурье-разложения молекул газа изопропилового спирта на воздушном фильтре без композиционных наноструктур (а), с композиционными наноструктурами: 0 В (б), 9 В (в) и 17 В (г)

Fig. 3. Results of FTIR decomposition of isopropyl alcohol gas molecules on an air filter without nanocomposite structures (a), with nanocomposite structures: 0 V (b), 9 V (v) and 17 V (r)

В спектрах контрольной группы (спектр а) идентифицированы характеристические полосы поглощения [19] молекулы $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$: 3658 см^{-1} (валентные колебания O-H), 2983 см^{-1} и 2892 см^{-1} (асимметричные колебания C-H в CH_3 -группах), 1385 см^{-1} (деформационные ко-

лебания C-H), 1073 см^{-1} (валентные колебания C-O) [20], 958 см^{-1} (скелетные колебания углеродной цепи) и 812 см^{-1} (валентные колебания C-C) [21]. На спектре, соответствующем композиционному наноматериалу без приложения напряжения (см. рис. 3, б), наблюдается значитель-

ное снижение интенсивности полос поглощения исходного соединения. Спектры, полученные при напряжениях 9 В (см. рис. 3, в) и 17 В (см. рис. 3, г), демонстрируют полное исчезновение сигналов изопропилового спирта с одновременным появлением новых полос поглощения: широкой полосы в области $4000\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ и сигналов в области $2000\text{--}1400\text{ см}^{-1}$, соответствующих образованию воды, а также характерного дублета в районе $2360\text{--}2339\text{ см}^{-1}$, свидетельствующего о генерации диоксида углерода. Полученные результаты подтверждают эффективность

протекания электрокаталитического превращения паров изопропилового спирта в воду и углекислый газ на поверхности гибридных наноматериалов при приложении разности потенциалов.

На рисунке 4 представлены спектральные характеристики процесса разложения паров бутилацетата ($\text{CH}_3\text{COO}(\text{C}_4\text{H}_9)$) на композитных материалах на основе оксида меди и углеродных наночастиц, зарегистрированных методом ИК-Фурье-спектроскопии при различных значениях приложенного напряжения.

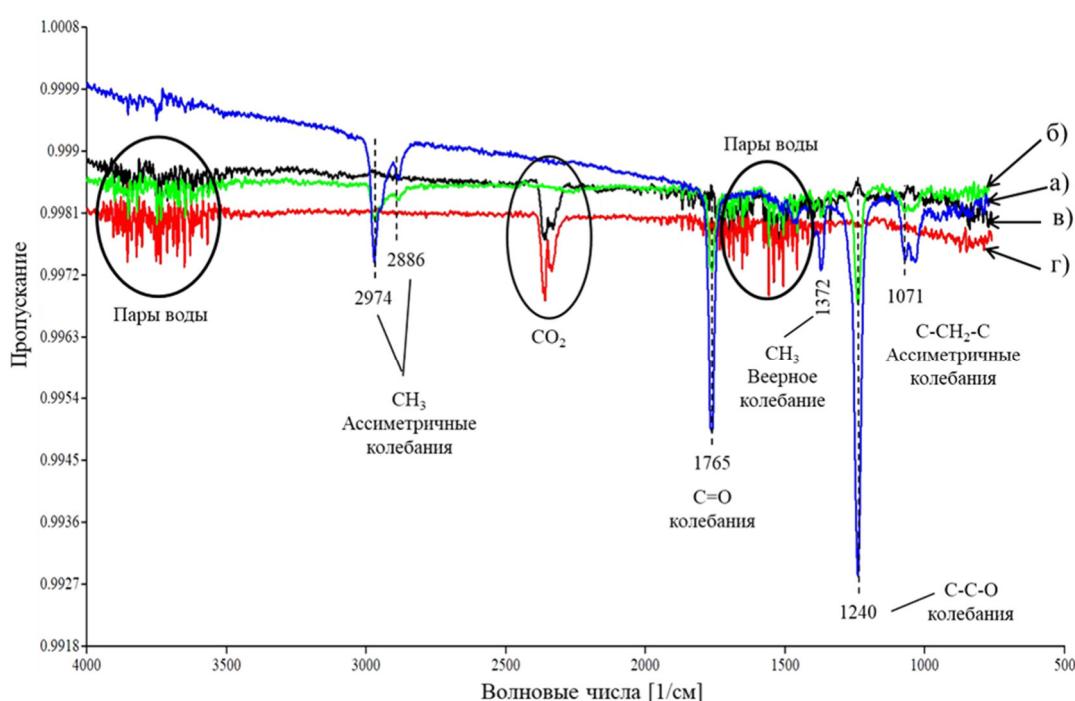


Рис. 4. Результаты ИК-Фурье разложения молекул газа бутилацетата на воздушном фильтре без композиционных наноструктур (а), с композиционными наноструктурами: 0 В (б), 9 В (в) и 17 В (г)

Fig. 4. Results of FTIR decomposition of butyl acetate gas molecules on an air filter without nanocomposite structures (а), with nanocomposite structures: 0 V (б), 9 V (в) and 17 V (г)

Сравнительный анализ проводился для системы без каталитического покрытия (см. рис. 4) и с композиционными наноматериалами при различных потенциалах. На контрольном спектре (см. рис. 4, а) идентифицированы характеристические полосы поглощения бутилацетата: 2974 см^{-1} и 2886 см^{-1} (асимметричные валентные колебания С-Н в CH_3 -группах),

1765 см^{-1} (валентные колебания C=O карбонильной группы), 1372 см^{-1} (деформационные колебания С-Н), 1240 см^{-1} (валентные колебания С-С-О) и 1071 см^{-1} (асимметричные колебания С- CH_2 -С). На спектре, полученном при пропускании паров через композиционный наноматериал без приложения напряжения (см. рис. 4, б), наблюдается снижение интенсивности полос поглощения исходного соединения.

Спектры, приведенные на рисунке 4, в–г, демонстрируют полное исчезновение сигналов бутилацетата при напряжениях 9 и 17 В соответственно с одновременным появлением полос поглощения, характерных для продуктов полной минерализации: широкой полосы в области $4000\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ и сигналов в области $2000\text{--}1400\text{ см}^{-1}$ (вода), а также дублета $2358\text{--}2345\text{ см}^{-1}$ (диоксид углерода). Полученные данные свидетельствуют об эффективном электрокаталитическом разложении бутилацетата на поверхности наноструктурированных материалов под действием приложенного электрического поля.

Пары изопропилового спирта ($(\text{CH}_3)_2\text{CHNOH}$) и бутилацетата ($\text{CH}_3\text{COO}(\text{C}_4\text{H}_9)$), полученные испарением жидкой фазы, пропускались через композиционное покрытие на основе оксида меди и углеродных наночастиц, нанесенное на поверхность воздушного фильтра, в цилиндрической реакционной

камере с регулируемым потоком, где транспортировка газовой среды обеспечивалась микродвигателем постоянного тока (см. рис. 1).

На рисунках 5 и 6 представлено разложение газообразных реагентов, полученных с использованием высокочувствительного датчика качества воздуха AGS02MA (MEMS-сенсор TVOC производства ASAIR): а) экспериментальные данные контрольного опыта, демонстрирующие медленную естественную деградацию реагентов в отсутствие каталитически активного материала; б) кинетика процесса в присутствии композиционных покрытий, показывающая значительное увеличение скорости разложения в условиях замкнутой системы; в, г – результаты исследования влияния циклического включения и отключения постоянного напряжения на эффективность разложения паров изопропилового спирта и бутилацетата.

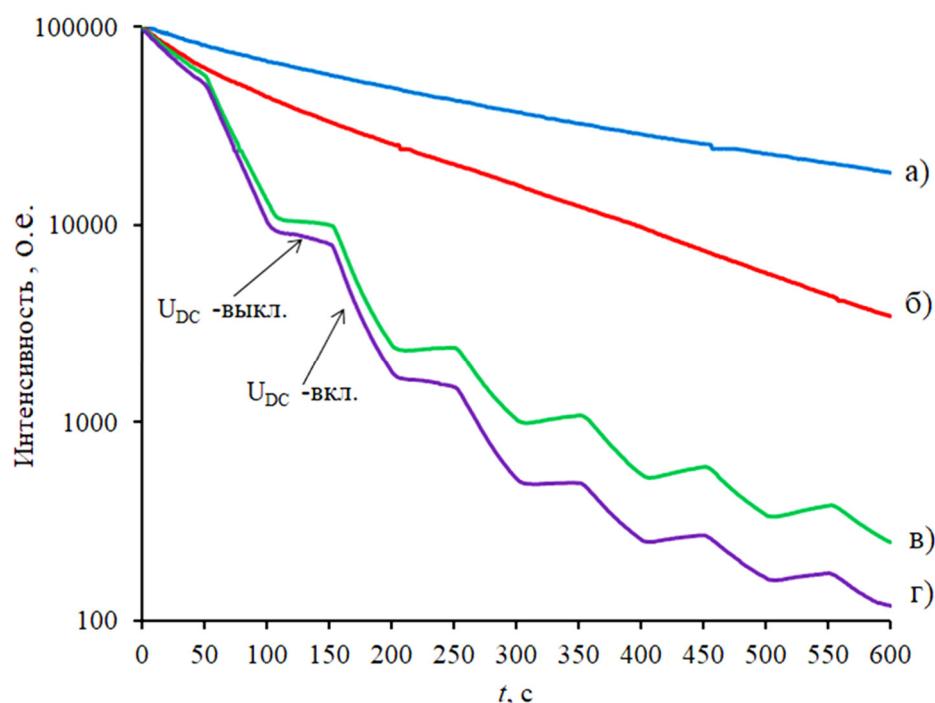


Рис. 5. Результаты разложения молекул газа изопропилового спирта без композиционных наноструктур (а), с композиционными наноструктурами: 0 В (б), 9 В (в) и 17 В (г) – с использованием датчика качества воздуха AGS02MA

Fig. 5. Results of decomposition of isopropyl alcohol gas molecules without nanocomposite structures (a), with nanocomposite structures: 0 V (b), 9 V (v) and 17 V (g) using the AGS02MA air quality sensor

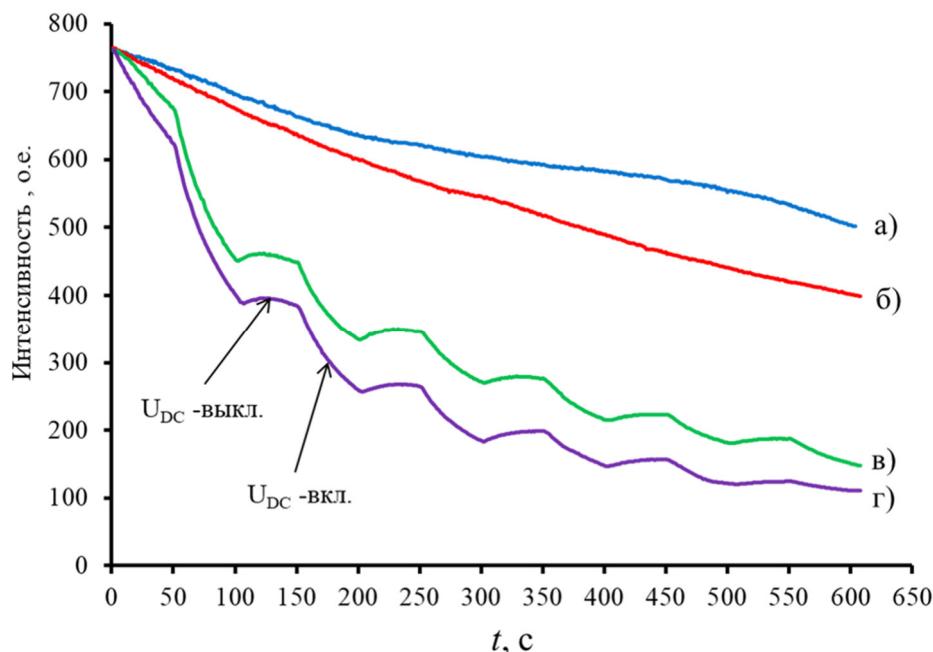


Рис. 6. Результаты разложения молекул газа бутилацетата без композиционных наноструктур (а), с композиционными наноструктурами: 0 В (б), 9 В (в) и 17 В (г) – с использованием датчика качества воздуха AGS02MA

Fig. 6. Results of decomposition of butyl acetate gas molecules without nanocomposite structures (a), with nanocomposite structures: 0 V (б), 9 V (в) and 17 V (г) using the AGS02MA air quality sensor

Полученные результаты убедительно демонстрируют, что процесс фильтрации летучих органических соединений, включая изопропиловый спирт и бутилацетат, через каталитически активные воздушные фильтры с композиционными покрытиями на основе оксида меди и углеродных наночастиц при приложении внешнего электрического потенциала от 9 В до 17 В приводит к их полной минерализации с образованием диоксида углерода и паров воды.

Выводы

1. Приложенное электрическое напряжение в диапазоне от 9 В до 17 В к композиционным наноструктурам CNPs/CuO значительно повышает эффективность

разложения летучих органических соединений изопропилового спирта и бутилацетата, обеспечивая их полную деградацию до CO_2 и H_2O .

2. Электрокatalитическая активность обусловлена генерацией активных форм кислорода ($\cdot\text{OH}$, O_2^-) на поверхности нанокомпозитов, что подтверждается данными ИК-Фурье-спектроскопии и кинетическими измерениями с применением датчика AGS02MA.

3. Разработанная система демонстрирует потенциал для создания энергоэффективных и экологически безопасных технологий очистки воздуха от летучих органических загрязнителей в промышленных и медицинских применениях.

Список литературы

1. Dissecting the interfaces of MOF-coated CdS on synergized charge transfer for enhanced photocatalytic CO_2 reduction / Q. Mu, Y. Su, Z. Wei, H. Sun, Y. Lian, Y. Dong [et al.] // Journal of Catalysis. 2021. Vol. 397. P. 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.03.018>.

2. Nanocomposites of Carbon nanotube (CNTs)/CuO with high sensitivity to organic volatiles at room temperature / J. Zheng, Q. Zhang, X. He, M. Gao, X. Ma, G. Li // Procedia Engineering. 2012. Vol. 36. P. 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.03.036>.
3. Synthesis of TiO₂-CuO graphene oxide hybrid bionanocomposite with enhanced antibacterial and organic dye degradation activities / B.A. Omran, M.O. Abdel-Salam, Farghal H.H., M.M.H. El-Sayed, K.H. Baek // Materials Advances. 2025. Vol. 6, no. 8. P. 2654-2676. <https://doi.org/10.1039/D5MA00031A>.
4. Unveiling the photocatalytic property of La₂O₃-CuO nanocomposites for organic pollutants in wastewater treatment / S. Karthikeyan, K. Dhanakodi, S. Surendhiran, K. Vanasundari, L. Arunraja, A.T. Rajamanickam // Journal of the Indian Chemical Society. 2023. Vol. 100, no. 11. P. 101104. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.101104>.
5. Surface plasmon resonance enhanced visible-light-driven photocatalytic activity in Cu nanoparticles covered Cu₂O microspheres for degrading organic pollutants / Y. Cheng, Y. Lin, J. Xu, J. He, T. Wang, G. Yu [et al.] // Applied Surface Science. 2016. Vol. 366. P. 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.238/>.
6. Graphene-assisted CuO nanoparticles enhanced the photocatalytic degradation of methylene blue under visible light: performance and electron transfer mechanisms / B.S. Navya, L. Chen, T.-B. Nguyen, M. Arshad, C.-W. Chen, C.-D. Dong // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2025. P. 106280. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106280>.
7. Constructing a system for effective utilization of photogenerated electrons and holes: photocatalytic selective transformation of aromatic alcohols to aromatic aldehydes and hydrogen evolution over Zn₃In₂S₆ photocatalysts / X. Ye, Y. Chen, Y. Wu, X. Zhang, X. Wang, S. Chen // Applied Catalysis B: Environmental. 2019. Vol. 242. P. 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.10.004>.
8. Carbon quantum dots decorated CuS nanocomposite for effective degradation of methylene blue and antibacterial performance / X. Wang, L. Li, Z. Fu, F. Cui // Journal of Molecular Liquids. 2018. Vol. 268. P. 578-586. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.07.086>.
9. Khan M.E. State-of-the-art developments in carbon-based metal nanocomposites as a catalyst: photocatalysis // Nanoscale Advances. 2021. Vol. 3, no. 7. P. 1887-1900. <https://doi.org/10.1039/D1NA00041A>.
10. In situ assembled GO/TiO₂ and GO/TiO₂/PANI nanocomposites for the enhanced photocatalytic degradation of benzene and toluene / S. Husain, S.A. Muhammad, K.A. Ali, M.S. Tanweer, N. Ahmad // Polymer Bulletin. 2025. Vol. 4. P. 1027. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-06027-4>.
11. Heterostructured Cu/CuO nanoparticles embedded within N-doped Carbon nanosheets for efficient oxygen reduction reaction / G. Xu, J. Huang, X. Li, Q. Chen, Y. Xie, Z. Liu [et al.] // Catalysts. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 255. <https://doi.org/10.3390/catal13020255>.
12. Nanostructured Carbon and Copper oxide: synchronous and facile synthesis from a single source and multidimensional applications / J. Akter, M.A. Hanif, I. Lee, S. Shrestha, A. Pandey, N. Gyawali [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 47. P. 144603. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144603>.
13. Fabrication and structural analysis of CuO-NiO and MWCNTs CuO-NiO hybrid nanostructures: versatile materials for environmental and biomedical remediation / A.L. Lone, S.U. Rehman, S. Haq, A.F. Alkhuriji, N.M. Al-Malahi, J. Razzokov [et al.] // RSC Advances. 2025. Vol. 15. P. 22311-22321. <https://doi.org/10.1039/D5RA02443A>.
14. Инфракрасные свойства многослойных нанокомпозитных пленок CuO/CNPs, полученных электрофоретическим синтезом / Ней Вин Аунг, М.А. Пугачевский, В.В. Филиппов, В.М. Емельянов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 2. С. 177-188. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-177-188>.
15. Oxygen vacancies-mediated CuON-doped Carbon nanocomposites for non-radical-dominated photothermal catalytic degradation of contaminants / Y. Chen, Y. Dai, Y. Li, Z. Hou, B. Gao, Q. Yue [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 389. P. 136054. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136054>.

16. Nickel substituted Cobalt nanoferrites for advanced photocatalytic and electrocatalytic green hydrogen generation / J. Prakash, R. Jasrotia, Suman, J. Ahmed, S.M. Alshehri, T. Ahmad [et al.] // Journal of Molecular Structure. 2025. Vol. 1321. P. 140162. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140162>.
17. Hybrid semiconductor photocatalyst nanomaterials for energy and environmental applications: fundamentals, designing, and prospects / K. Mishra, N. Devi, S.S. Siwal, V.K. Gupta, V.K. Thakur // Advanced Sustainable Systems. 2025. Vol. 7. P. 2300095. <https://doi.org/10.1002/adsu.202300095>.
18. Singlet oxygen driven enhanced photocatalytic degradation of 1,3,7-trimethylpurine-2,6-dione using surfactant mediated PVA-CuO nanocomposites: combining physical adsorption and photocatalysis / V.G.D. Kumar, S. Kumari, K.R. Balaji, A.A. Khan, C.R. Ravikumar, B.M. Basavaraja [et al.] // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 462. P. 142187. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142187>.
19. Photocatalytic degradation of organic and inorganic pollutants to harmless end products: assessment of practical application potential for water and air cleaning / M. Raculete, C. Anastasescu, R.-N. State, A. Vasile, F. Papa, I. Balint // Catalysts. 2023. Vol. 13. P. 380. <https://doi.org/10.3390/catal13020380>.
20. Combining the bioelectricity generation with photo-electrocatalytic reduction of CO₂ for pollutants degradation and ethanol generation / M. Mehravaran, S. Aber, K. Asadpour-Zeynali // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2023. Vol. 941. P. 117541. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117541>.
21. Mechanistic insights into H₂O dissociation in overall photo-/electro-catalytic CO₂ reduction / M. Ma, Y. Fang, Z. Huang, S. Wu, W. He, S. Ge [et al.] // Angewandte Chemie. 2023. Vol. 941. P. 137. <https://doi.org/10.1002/ange.202425195>.

References

1. Mu Q., Su Y., Wei Z., Sun H., Lian Y., Dong Y., et al. Dissecting the interfaces of MOF-coated CdS on synergized charge transfer for enhanced photocatalytic CO₂ reduction. *Journal of Catalysis*. 2021;397:128-136. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2021.03.018>.
2. Zheng J., Zhang Q., He X., Gao M., Ma X., Li G. Nanocomposites of Carbon nanotube (CNTs)/CuO with high sensitivity to organic volatiles at room temperature. *Procedia Engineering*. 2012;36:235-245. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.03.036>.
3. Omran B. A., Abdel-Salam M. O., Farghal H. H., El-Sayed M. M. H., Baek K. H. Synthesis of TiO₂-CuO graphene oxide hybrid bionanocomposite with enhanced antibacterial and organic dye degradation activities. *Materials Advances*. 2025;6(8):2654-2676. <https://doi.org/10.1039/D5MA00031A>.
4. Karthikeyan S., Dhanakodi K., Surendhiran S., Vanasundari K., Arunraja L., Rajamanickam A.T. Unveiling the photocatalytic property of La₂O₃-CuO nanocomposites for organic pollutants in wastewater treatment. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2023;100(11):101104. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2023.101104>.
5. Cheng Y., Lin Y., Xu J., He J., Wang T., Yu G., et al. Surface plasmon resonance enhanced visible-light-driven photocatalytic activity in Cu nanoparticles covered Cu₂O microspheres for degrading organic pollutants. *Applied Surface Science*. 2016;366:120-128. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.238>.
6. Navya B. S., Chen L., Nguyen T.-B., Arshad M., Chen C.-W., Dong C.-D. Graphene-assisted CuO nanoparticles enhanced the photocatalytic degradation of methylene blue under visible light: Performance and electron transfer mechanisms. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2025;106280. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106280>.
7. Ye X., Chen Y., Wu Y., Zhang X., Wang X., Chen S. Constructing a system for effective utilization of photogenerated electrons and holes: Photocatalytic selective transformation of aromatic

alcohols to aromatic aldehydes and hydrogen evolution over $Zn_3In_2S_6$ photocatalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2019;242:302-311. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.10.004>.

8. Wang X., Li L., Fu Z., Cui F. Carbon quantum dots decorated CuS nanocomposite for effective degradation of methylene blue and antibacterial performance. *Journal of Molecular Liquids*. 2018;268:578-586. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.07.086>.

9. Khan M. E. State-of-the-art developments in Carbon-based metal nanocomposites as a catalyst: photocatalysis. *Nanoscale Advances*. 2021;3(7):1887-1900. <https://doi.org/10.1039/D1NA00041A>.

10. Husain S., Muhammad S.A., Ali K.A., Tanweer M.S., Ahmad N. In situ assembled GO/TiO₂ and GO/TiO₂/PANI nanocomposites for the enhanced photocatalytic degradation of benzene and toluene. *Polymer Bulletin*. 2025;4:1027. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-06027-4>.

11. Xu G., Huang J., Li X., Chen Q., Xie Y., Liu Z., et al. Heterostructured Cu/CuO nanoparticles embedded within N-doped carbon nanosheets for efficient oxygen reduction reaction. *Catalysts*. 2023;13(2):255. <https://doi.org/10.3390/catal13020255>.

12. Akter J., Hanif M.A., Lee I., Shrestha S., Pandey A., Gyawali N., et al. Nanostructured Carbon and Copper oxide: synchronous and facile synthesis from a single source and multidimensional applications. *Chemical Engineering Journal*. 2023;47:144603. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144603>.

13. Lone A.L., Rehman S.U., Haq S., Alkhuriji A.F., Al-Malahi N.M., Razzokov J., et al. Fabrication and structural analysis of CuO-NiO and MWCNTs CuO-NiO hybrid nanostructures: versatile materials for environmental and biomedical remediation. *RSC Advances*. 2025;15:22311-22321. <https://doi.org/10.1039/D5RA02443A>.

14. Nay Win Aung, Pugachevskii M.A., Filippov V.V., Emelianov V.M. Infrared sensor properties of multilayer CuO/CNPs nanocomposite films obtained by electrophoretic synthesis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(2):177-188. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-2-177-188>.

15. Chen Y., Dai Y., Li Y., Hou Z., Gao B., Yue Q., et al. Oxygen vacancies-mediated CuO N-doped Carbon nanocomposites for non-radical-dominated photothermal catalytic degradation of contaminants. *Journal of Cleaner Production*. 2023;389:136054. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136054>.

16. Prakash J., Jasrotia R., Suman, Ahmed J., Alshehri S.M., Ahmad T., et al. Nickel substituted cobalt nanoferrites for advanced photocatalytic and electrocatalytic green hydrogen generation. *Journal of Molecular Structure*. 2025;1321:140162. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.140162>.

17. Mishra K., Devi N., Siwal S.S., Gupta V.K., Thakur V.K. Hybrid semiconductor photocatalyst nanomaterials for energy and environmental applications: fundamentals, designing, and prospects. *Advanced Sustainable Systems*. 2025;7:2300095. <https://doi.org/10.1002/adsu.202300095>.

18. Kumar V.G.D., Kumari S., Balaji K.R., Khan A.A., Ravikumar C.R., Basavaraja B.M., et al. Singlet oxygen driven enhanced photocatalytic degradation of 1,3,7-trimethylpurine-2,6-dione using surfactant mediated PVA-CuO nanocomposites: combining physical adsorption and photocatalysis. *Chemical Engineering Journal*. 2023;462:142187. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142187>.

19. Raculete M., Anastasescu C., State R.-N., Vasile A., Papa F., Balint I. Photocatalytic degradation of organic and inorganic pollutants to harmless end products: Assessment of practical application potential for water and air cleaning. *Catalysts*. 2023;13:380. <https://doi.org/10.3390/catal13020380>.

20. Mehravaran M., Aber S., Asadpour-Zeynali K. Combining the bioelectricity generation with photo-electrocatalytic reduction of CO₂ for pollutants degradation and ethanol generation. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2023;941:117541. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117541>.

21. Ma M., Fang Y., Huang Z., Wu S., He W., Ge S., et al. Mechanistic insights into H₂O dissociation in overall photo-/electro-catalytic CO₂ reduction. *Angewandte Chemie*. 2023;941:137. <https://doi.org/10.1002/ange.202425195>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Ней Вин Аунг, аспирант кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: naywinaungnano@gmail.com

Пугачевский Максим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, директор Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pmaximal@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5004-0823

Nay Win Aung, Postgraduate Student at the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: naywinaungnano@gmail.com

Maksim A. Pugachevskii, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor at the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Director of the Regional center of nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pmaximal@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5004-0823