

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

DOI 10.21672/2074-1707.2021.55.3.009-015  
УДК 658.5.011

### ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАТАЛИЗАТОРА СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

*Статья поступила в редакцию 28.05.2021, в окончательном варианте – 29.06.2021.*

**Буракова Елена Анатольевна**, Тамбовский государственный технический университет, 392000, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Советская, 106  
кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0001\_8927\_7433, e-mail: elenburakova@yandex.ru

Цель исследования – разработка информационной системы сопровождения и поддержки принятия решений в производстве металлоксидного катализатора, обеспечивающего направленный синтез углеродных нанотрубок методом газофазного химического осаждения. Для достижения цели были решены следующие задачи: разработан новый подход к процессу получения катализатора методом термического разложения неустойчивых соединений для синтеза углеродных нанотрубок; проведены экспериментальные исследования влияния пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников физическим воздействием (ультразвук, электромагнитное и микроволновое поле и др.); получены аппроксимирующие зависимости характеристик синтезируемых углеродных наноструктур от параметров процесса пред- и посттермической обработки катализатора, которые использовались при создании модуля рекомендаций. На основе полученных результатов были разработаны блок сопровождения производства и модуль рекомендаций, используемые при создании системы сопровождения и поддержки принятия решений производства катализатора для синтеза углеродных нанотрубок. Применение разработанной информационной системы сопровождения и поддержки принятия решений позволяет формировать катализатор, позволяющий синтезировать углеродные нанотрубки с заданными характеристиками. Также использование данной информационной системы при производстве катализатора способствует расширению ассортимента синтезируемой нанопродукции в процессе газофазного химического осаждения без изменения состава катализатора.

**Ключевые слова:** система поддержки принятия решений, система сопровождения производства, катализатор, метод газофазного химического осаждения, направленный синтез углеродных нанотрубок

### INFORMATION SUPPORT FOR DECISION-MAKING IN THE PRODUCTION OF THE CATALYST FOR THE SYNTHESIS OF CARBON NANOTUBES

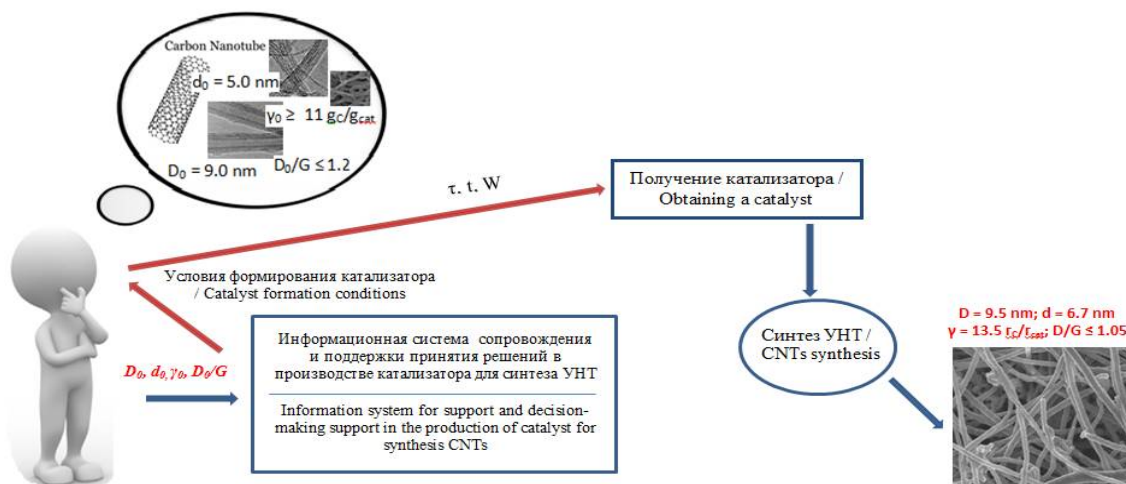
*The article was received by the editorial board on 28.05.2021, in the final version – 29.06.2021.*

**Burakova Elena A.**, Tambov State Technical University, 106 Sovetskaya St., Tambov, 392000, Russian Federation,  
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0001\_8927\_7433, e-mail: elenburakova@yandex.ru

The aim of the study is to develop information systems for supporting and supporting decision-making in the production of a metal oxide catalyst that provides targeted synthesis of carbon nanotubes by gas-phase chemical deposition. To achieve the goal, the following tasks were solved: a new approach to the process of creating a catalyst for the thermal decomposition of unstable compounds for synthetic nanotubes was developed; experimental studies of the effect on the post-thermal treatment of the catalyst and its precursors by physical action (ultrasonic, electromagnetic and microwave fields, etc.), which were obtained the approximating characteristics of the synthesized models of carbon nanostructures on the parameters of the process of pre- and post-thermal treatment of the catalyst were used to create a recommendation module. On the basis of the results obtained, blocks of implementation and technologies were developed, used in the creation of a system for maintaining and supporting solutions for the production of a catalyst for synthetic nanotubes. The application of the developed system of maintenance and support of decisions makes it possible to form a catalyst that makes it possible to synthesize carbon nanotubes with specified characteristics. Also, the use of this information system in the production of a catalyst helps to expand the range of synthesized nanoproducts in the process of gas-phase chemical deposition without changing the composition of the catalyst.

**Keywords:** decision support system, production tracking system, catalyst, chemical vapor deposition method, directed synthesis of carbon nanotubes

## Graphical annotation (Графическая аннотация)



**Введение.** В настоящее время углеродные нанотрубки (УНТ) широко используются в различных областях науки и техники. Однако для каждой области применения необходимы УНТ с определенными характеристиками [2, 8, 13, 14]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных разработке катализаторов и синтезу УНТ на них, до сих пор актуальной остается проблема реализации синтеза наноструктур с заданными характеристиками (направленный синтез), что обусловлено отсутствием общей теории формирования УНТ на частице катализатора.

Анализ современного состояния науки и техники промышленного производства УНТ методом газофазного химического осаждения (ГФХО) выявил тенденцию, заключающуюся в строгом соотношении состава катализатора и морфологии синтезированных наноструктур (один состав катализатора – один тип УНТ). Такой подход создает трудности при расширении ассортимента синтезируемой нанопродукции, так как требует новых рецептов катализаторов, методик их получения, а, зачастую, и специализированного оборудования. Возможность гибкого управления процессом формирования УНТ на катализаторе открывает новые производственные возможности. В настоящее время характеристиками синтезируемых УНТ управляют путем изменения состава катализатора и условий ГФХО. Исходя из того, что между диаметральными размерами УНТ и размерами частиц активного компонента катализатора наблюдается корреляция [11, 12, 6], можно сделать вывод о том, что через процесс получения катализатора также можно управлять процессом формирования нанотрубок. Поэтому при производстве катализатора необходимо уделять внимание не только составу, но и способу его получения.

Предварительное исследование процесса получения катализатора методом термического разложения неустойчивых соединений [9, 10] показало, что через реализацию предтермической обработки его предшественника (раствора исходных компонентов катализатора) физическим воздействием (ультразвук, электромагнитное поле и др.) можно для одного состава катализатора формировать каталитические системы с разными свойствами. Физические методы воздействия используются при получении различных катализаторов, в частности для гидрирования [5], реакции дейтеро-водородного обмена [7], но не применяются при производстве катализаторов синтеза УНТ. Применение физических воздействий в процессе получения катализатора для синтеза УНТ может быть использовано с целью их активации и управления формированием каталитических систем синтеза УНТ.

Современное производство, в том числе и катализаторов для синтеза УНТ, сложно представить без использования информационных технологий. Накопленный объем знаний и информации о процессах формирования катализаторов и их характеристиках требует обобщения и систематизации для эффективного использования при разработке производства катализатора синтеза УНТ в промышленных масштабах. Для обобщения знаний, своевременного реагирования на новые знания об изменениях, происходящих в процессе формирования УНТ, и дальнейшего совершенствования их производства методом ГФХО необходима информационная поддержка на всех стадиях получения нанопродукта.

Так как катализатор является источником зарождения и роста УНТ, то создание информационной системы сопровождения (ИСС) и поддержки принятия решения (СППР) при его промышленном производстве может позволить осуществлять в процессе синтеза гибкое управление формированием УНТ. Одним из примеров, подтверждающих эффективность использования ИС при подборе катализатора на основе высокопористых ячеистых материалов для конкретного технологического процесса

без проведения экспериментов, является ИС «InfoKat» [3]. Обзор существующих ИС выявил отсутствие систем для подбора режимных параметров формирования катализатора синтеза УНТ, в связи с чем целью работы являлась разработка СППР производства катализатора, обеспечивающей получение информации, необходимой для реализации направленного синтеза наноструктур.

Разработка информационной СППР, предусматривающей управление информационными потоками, упрощение поиска необходимой информации и отсеивание неактуальной информации [1] в производстве катализатора, позволит определить условия его формирования, способствующие получению каталитической системы, обеспечивающей направленный синтез УНТ.

**Информационная система сопровождения и поддержки принятия решений в производстве катализатора.** В работе были успешно решены следующие задачи: разработан новый подход к управлению процессом формирования катализатора синтеза углеродных наноструктур; экспериментально исследовано влияние пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников физическим воздействием; получены аппроксимирующие зависимости характеристик синтезируемых УНТ от параметров процесса формирования каталитической системы, необходимые для создания модуля рекомендаций; созданы блок сопровождения производства и модуль рекомендаций; разработана СППР производства катализатора для направленного синтеза углеродных наноструктур.

В данной работе впервые был разработан и использован при создании информационной СППР новый подход к управлению качественными и количественными характеристиками металлоксидного катализатора для синтеза УНТ, основанный на пред- и посттермической его обработке ультразвуковым, электромагнитным, микроволновым полем и прокаливанием в процессе получения. Схема управления процессом формирования катализатора, обеспечивающего направленный синтез УНТ, представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Структурная схема управления процессом формирования катализатора синтеза УНТ

В рамках предлагаемого научного подхода, управление формированием катализатора может осуществляться не только за счет варьирования состава катализатора, но и в первую очередь за счет пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников физическим воздействием. Таким образом, используемые физические воздействия в процессе формирования катализатора в первую очередь направлены на получение катализатора, позволяющего синтезировать УНТ с заданными характеристиками. Организовать управление процессом формирования катализатора можно, используя решение оптимизационной задачи, позволяющей найти такие условия получения каталитической системы (тип физического воздействия и условия пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников), при которых будет обеспечен синтез УНТ с характеристиками наиболее близкими к заданным.

При разработке СППР был использован метод анализа иерархий [4], дающий возможность оценить все возможные варианты организации процесса формирования катализатора по результатам решения оптимизационной задачи. Окончательный выбор варианта осуществляется ЛПР.

На основе вышеизложенного была разработана ИС, выполняющая следующие функции:

- учет исходного сырья;
- ведение электронных журналов анализа физико-химических свойств сырья;
- ведение технологической карты;
- ведение электронных журналов анализа физико-химических свойств катализатора;
- учет хранения готового катализатора;
- рекомендации технологических режимов получения катализатора с характеристиками, обеспечивающими направленный синтез УНТ.

Разработанная ИС содержит блок сопровождения производства и модуль рекомендаций. При создании блока сопровождения производства катализатора был использован программный продукт SupraSoft 1.10, а при создании блока поддержки принятия решения (Блок рекомендаций) – Borland Delphi 7. Структурная схема разработанной ИС представлена на рисунке 2.

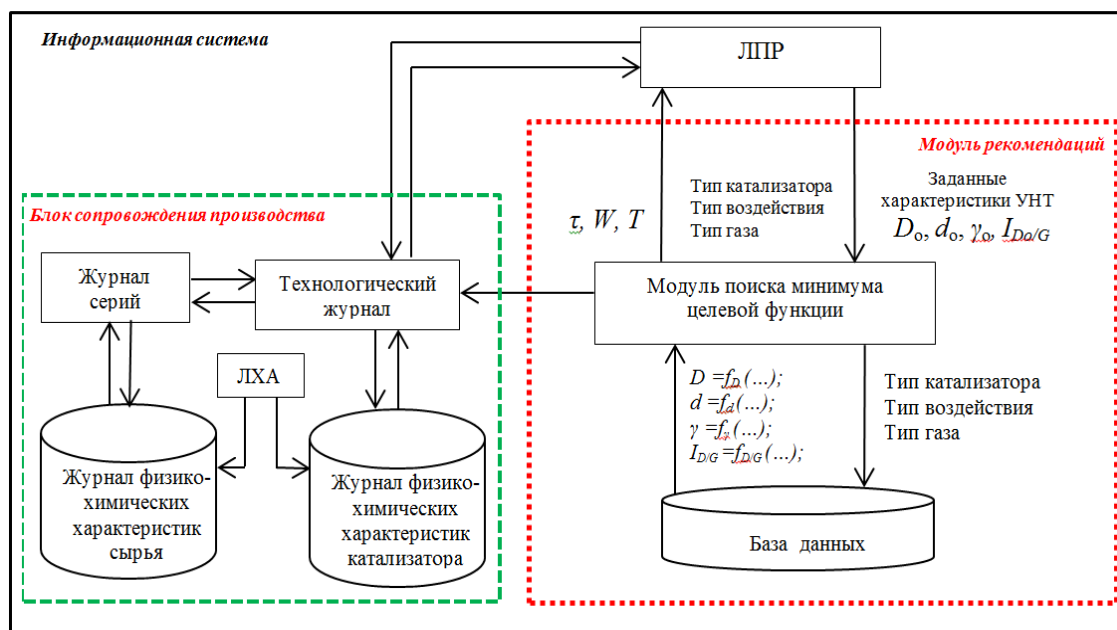


Рисунок 2 – Структурная схема ИС сопровождения и СППР:  $\tau$  – время;  $T$  – температура;  $W$  – удельная мощность физического воздействия на катализатор и его предшественники;  $D$ ,  $d$ ,  $\gamma$ ,  $D/G$  – расчетные значения внешнего и внутреннего диаметра, удельного выхода и степени дефектности УНТ соответственно; ЛХА – лаборант химического анализа

Разработанная ИС содержит журналы серий, журналы физико-химических характеристик сырья и катализатора и модуль выработки рекомендаций. ЛПР через интерфейс блока «Технологический журнал» создает технологическую карту будущей партии катализатора. Затем вызвав блок «Модуль рекомендаций» ЛПР передает ожидаемые характеристики синтезируемых УНТ, вид используемых углеродсодержащих газов, рецептур катализатора и способов физического воздействия модулю поиска минимума целевой функции. Целевая функция характеризует степень отклонения параметров синтезируемых УНТ от ожидаемых/заданных значений. Общий вид рабочего окна модуля рекомендаций представлен на рисунке 3.

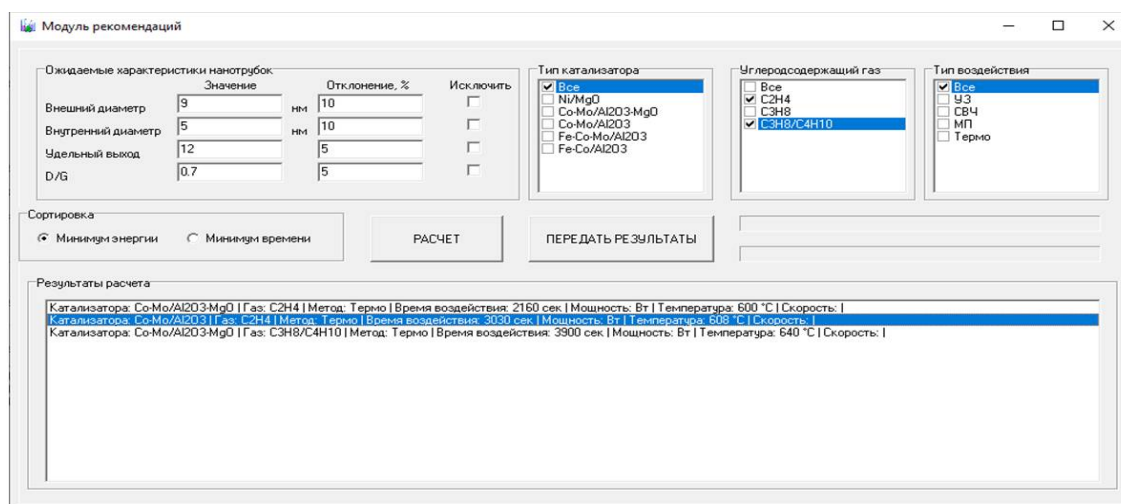


Рисунок 3 – Общий вид рабочего окна модуля рекомендаций

Модуль поиска минимума целевой функции в соответствии со структурой иерархической базы данных перебирает все допустимые варианты соотношений «Тип катализатора» – «Тип воздействия» – «Тип газа» и для каждого варианта из базы данных передает набор зависимостей:  $D = f_D(\dots)$ ;  $d = f_d(\dots)$ ;  $\gamma = f_\gamma(\dots)$ ;  $D/G = f_{D/G}(\dots)$  в виде аппроксимирующих функций от  $\tau$ ,  $T$  и  $W$ , полученных в результате обработки экспериментальных данных. Методом сканирования определяется минимум целевой функции и сохраняются значения условий пред- и посттермической обработки катализатора и его предшественников физическим воздействием для данной комбинации соотношений «Тип катализатора» – «Тип воздействия» – «Тип газа». Далее процедура обращения модуля поиска минимума целевой функции к базе данных повторяется для всех вариантов, в результате чего выстраивается последовательность режимов, отсортированная по возрастанию целевой функции. Данный рейтинг предоставляется ЛПР для выбора конкретного режима, после чего он передается в блок «Технологический журнал» ИС.

На следующем этапе в технологической карте указывается номер серии катализатора. Серия формируется путем компоновки карточек исходного сырья, содержащих результаты физико-химических характеристик используемых веществ. Результаты на вновь поступившее сырье в ИС вносит ЛХА. Далее ЛПР, с учетом выбранного режима, реализует процесс получения катализатора, осуществляя отбор проб промежуточных продуктов и исследование их физико-химических характеристик, заносит их в технологическую карту. По окончании процесса формирования катализатора ЛХА отбирает пробы и проводит их диагностику, полученные результаты также заносит в базу данных блока «Журнал физико-химических характеристик катализатора».

База данных в ИС реализована в виде текстового файла заданной структуры, что позволяет легко вводить в нее данные других рецептов катализатора и результаты исследования новых физических воздействий на них и при этом не требует сложных систем обслуживания. Модуль рекомендаций активно использует базу данных в процессе решения оптимизационной задачи. При выборе типа физического воздействия указываются зависимости характеристик синтезированных УНТ от условий реализации процесса получения катализатора. Таким образом, ИС при запуске использует заголовки рецептов катализаторов, типов газов и способов воздействия для формирования списка вариантов, предоставляемого ЛПР.

Разработанная проблемно-ориентированная система сопровождения и поддержки принятия решения была апробирована в ООО «НаноТехЦентр» (г. Тамбов). Были найдены условия получения катализатора, обеспечивающего синтез коаксиальных УНТ с заданными характеристиками ( $D_0 = 9,0$  нм;  $d_0 = 5,0$  нм;  $\gamma_0 \geq 11$  гс/г<sub>кат</sub>,  $D_0/G \leq 1,2$ ). В результате расчета модуль рекомендовал применение катализатора состава Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO, полученного с использованием посттермической обработки металлоксидной системы при температуре 600 °С в течение часа в присутствии дополнительной подачи воздуха. Использование полученного при найденных режимах Co-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO катализатора в процессе ГФХО (углеродсодержащий газ – C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) приводит к формированию УНТ ( $D = 9,5$  нм;  $d = 6,7$  нм;  $\gamma = 13,5$  гс/г<sub>кат</sub>,  $D/G \leq 1,05$ ).

**Заключение.** В настоящее время проблема реализации направленного синтеза УНТ методом ГФХО стала весьма актуальной, так как после открытия УНТ основное внимание уделялось изучению их свойств и освоению промышленного производства, а не изучению механизмов формирования

наноструктур и способов управления этим процессом. Неизученность механизмов формирования УНТ на частицах катализатора и разрозненность имеющейся информации (множество рецептов катализаторов для синтеза УНТ) не позволяют решить проблему реализации направленного синтеза УНТ. В данной работе представлен новый подход к управлению процессом формирования углеродных наноструктур не через состав катализатора, а через пред- и посттермическую обработку катализатора и его предшественников физическим воздействием. Проведенные экспериментальные исследования доказали возможность управления процессом синтеза УНТ с использованием предлагаемого подхода, позволили определить аппроксимирующие зависимости и на их основе разработать специальное математическое обеспечение, устанавливающее связь между условиями физического воздействия на катализатор/его предшественники и характеристиками нанопродукта, которое использовалось в качестве основы при создании СППР. В результате чего была разработана ИС сопровождения и СППР при производстве катализатора синтеза УНТ, позволяющая обеспечить направленный синтез наноструктур методом ГФХО на катализаторе. Использование в производстве УНТ разработанной СППР позволит не только решить проблему реализации их направленного синтеза, но и расширить ассортимент производимой нанопродукции без изменения состава катализатора.

#### Библиографический список

1. Головицына, М. В. Информационные технологии в экономике : учебное пособие / М. В. Головицына. – М. ; Саратов : ИНТУИТ ; Ай Пи Ар Медиа, 2020. – 589 с.
2. Литовка, Ю. В. Процесс получения наномодифицированных цинковых покрытий с повышенной равномерностью / Ю. В. Литовка, Д. Н. Симагин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 4. – С.886–889.
3. Прокудин, С. В. Разработка информационной системы выбора и расчета катализаторов на основе ВПЯМ / С. В. Прокудин, А. В. Беспалов, В. Н. Грунский, А. И. Козлов // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. XXI, № 2 (70). – С. 79–84.
4. Рыбак, В. А. Аналитический обзор и сравнение существующих технологий поддержки принятия решений / В. А. Рыбак, Шокар Ахмад // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 3. – С. 12–18.
5. Сульман, М. Г. Влияние ультразвука на каталитические процессы / М. Г. Сульман // Успехи химии. – 2000. – Т. 69, № 2. – С. 178–191.
6. Царева, С. Ю. Исследования влияния природы и размера частиц катализатора на образование нанотрубок в методе каталитического пиролиза углеводородов / С. Ю. Царева, Е. В. Жариков, А. Н. Коваленко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2004. – № 6. – С. 38–42.
7. Шелимов, Б. Н. Нетрадиционные методы активации оксидных катализаторов с нанесенными ионами переходных металлов / Б. Н. Шелимов // Российский химический журнал. – 2000. – Т. 44, вып. 1. – С. 57–70.
8. Ali, J. Ali. Thermophysical Properties of Nanomodified Liquids / Ali J. Ali, E. N. Tugolukov, L. J. Habeeb // Advanced Materials & Technologies. – 2020. – № 1 (17). – P. 18–26.
9. Burakova, E. A. Effect of Ultrasound on a Mixed Oxide-Based Catalyst in the Synthesis of Carbon Nanostructured Materials / E. A. Burakova, E. V. Galunin, A. V. Rukhov, N. R. Memetov, A. G. Tkachev // Research on Chemical Intermediates. – 2016. – № 42 (9). – P. 7045–7055.
10. Burakova, E. A. Novel and Economic Method of Carbon Nanotubes Synthesis on a Nickel Magnesium Oxide Catalyst Using Microwave Radiation / E. A. Burakova, T. P. Dyachkova, A. V. Rukhov, E. N. Tugolukov, E. V. Galunin, A. G. Tkachev, A. A. Basheer, Al. Imran // Journal of Molecular Liquids. – 2018. – Vol. 253. – P. 340–346.
11. Cheung, C. L. Carbon Nanotube Atomic Force Microscopy Tips: Direct Growth by Chemical Vapor Deposition and Application to High-Resolution Imaging / C. L. Cheung, J. H. Hafner, C. M. Lieber // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2000. – № 97 (8). – P. 3809–3813.
12. Ding, F. Molecular Dynamics Study of the Catalyst Particle Size Dependence on Carbon Nanotube Growth / F. Ding, A. Rosen, K. Bolton // Journal of Chemical Physics. – 2004. – № 121 (6). – P. 2775–2779.
13. Dyachkova, T. P. Effects of the Nature of Oxidant and Synthesis Conditions on Properties of Nanocomposites Ppolyaniline/Carbon Nanotubes / T. P. Dyachkova, A. V. Melezhyk, Zh. G. Morozova, A. V. Shuklinov, A. G. Tkachev // Transactions TSTU. – 2012. – Vol. 18, № 3. – P. 718–730.
14. Nasraoui, M. The Effect of Combinations of Carbon Nanomaterials on the Microhardness of the Chromium Galvanic Coating / M. Nasraoui, Yu. V. Litovka, V. Yu. Dolmatov // Advanced Materials & Technologies. – 2020. – № 3 (19). – P. 56–63.

#### References

1. Golovitsyna, M. V. *Informatsionnyye tekhnologii v ekonomike : uchebnoye posobiye* [Information technology in the economy : tutorial]. Moscow ; Saratov, INTUIT Publ. ; Ay Pi Ar Media Publ., 2020. 589 p.
2. Litovka, Yu. V., Simagin, D. N. *Protsess polucheniya nanomodifitsirovannykh tsinkovykh pokrytiy s povyshennoy ravnomernostyu* [The process of obtaining nanomodified zinc coatings with increased uniformity]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tambov State Technical University], 2013, vol. 19, no. 4, pp. 886–889.
3. Prokudin, S. V., Bepalov, A. V., Grunskiy, V. N., Kozlov, A. I. *Razrabotka informatsionnoy sistemy vybora i rascheta katalizatorov na osnove VPYAM* [Development of an information system for the selection and calculation

of catalysts based on HPCM]. *Uspekhi v khimii i khimicheskikh tekhnologiyakh* [Advances in chemistry and chemical technology], 2007, vol. XXI, no. 2 (70), pp. 79–84.

4. Rybak, V. A., Akhmad Shokr. Analiticheskiy obzor i sravneniye tekhnologiy podderzhki prinyatiya resheniy [Analytical review and comparison of existing decision support technologies]. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [Systems Analysis and Applied Informatics], 2016, no. 3, pp. 12–18.

5. Sulman, M. G. Vliyaniye ultrazvuka na kataliticheskiye protsessy [Influence of ultrasound on catalytic processes]. *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry], 2000, vol. 69, no. 2, pp. 178–191.

6. Tsareva, S. Yu., Zharikov, Ye. V., Kovalenko, A. N. Issledovaniya vliyaniya prirody i chastits katalizatora na obrazovaniye nanotrubok v metode kataliticheskogo piroliza uglevodorodov [Investigation of the influence of the nature and size of catalyst particles on the formation of nanotubes in the method of catalytic pyrolysis of hydrocarbons]. *Naukoyemkiye tekhnologii* [Science-Intensive Technologies], 2004, no. 6, pp. 38–42.

7. Shelimov, B. N. Netraditsionnyye metody aktivatsii oksidnykh katalizatorov s nanesennymi ionami perekhodnykh metallov [Unconventional Methods for Activating Oxide Catalysts with Supported Transition Metal Ions]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2000, vol. 44, no. 1, pp. 57–70.

8. Ali, J. Ali, Tugolukov, E. N., Habeeb, L. J. Thermophysical Properties of Nanomodified Liquids. *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 1 (17), pp. 18–26.

9. Burakova, E. A., Galunin, E. V., Rukhov, A. V., Memetov, N. R., Tkachev, A. G. Effect of Ultrasound on a Mixed Oxide-Based Catalyst in the Synthesis of Carbon Nanostructured Materials. *Research on Chemical Intermediates*, 2016, no. 42 (9), pp. 7045–7055.

10. Burakova, E. A., Dyachkova, T. P., Rukhov, A. V., Tugolukov, E. N., Galunin, E. V., Tkachev, A. G., Basheer, A. A., Imran, Al. Novel and Economic Method of Carbon Nanotubes Synthesis on a Nickel Magnesium Oxide Catalyst Using Microwave Radiation. *Journal of Molecular Liquids*, 2018, no. 253, pp. 340–346.

11. Cheung, C. L., Hafner, J. H., Lieber, C. M. Carbon Nanotube Atomic Force Microscopy Tips: Direct Growth by Chemical Vapor Deposition and Application to High-Resolution Imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, no. 97 (8), pp. 3809–3813.

12. Ding F., Rosen A., Bolton K. Molecular Dynamics Study of the Catalyst Particle Size Dependence on Carbon Nanotube Growth. *Journal of Chemical Physics*, 2004, no. 121 (6), pp. 2775–2779.

13. Dyachkova, T. P., Melezhyk, A. V., Morozova, Zh. G., Shuklinov, A. V., Tkachev, A. G. Effects of the Nature of Oxidant and Synthesis Conditions on Properties of Nanocomposites Ppolyaniline/Carbon Nanotubes. *Transactions TSTU*, 2012, vol. 18, no. 3, pp. 718–730.

14. Nasraoui, M., Litovka, Yu. V., Dolmatov, V. Yu. The Effect of Combinations of Carbon Nanomaterials on the Microhardness of the Chromium Galvanic Coating. *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 3 (19), pp. 56–63.

УДК 621.397

## **О ПОГРЕШНОСТИ СКРЫТНОГО СУБПОЛОСНОГО ВНЕДРЕНИЯ ДАННЫХ В ЦВЕТОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Статья поступила в редакцию 16.06.2021, в окончательном варианте – 18.06.2021.*

**Черноморец Дарья Андреевна**, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85, аспирант, ORCID: 0000-0002-9626-9455, e-mail: daria013ch@yandex.ru

Работа посвящена исследованию проблемы скрытного внедрения данных в цветные цифровые изображения, актуальность которой обусловлена необходимостью организации контроля за распространением и использованием, например, авторских цифровых фотографий. В работе приведены основные положения метода скрытного субполосного внедрения данных в изображения в рамках косинус преобразования, основанного на относительном изменении (с учетом значений внедряемых данных) проекций изображения-контейнера, представленного в оттенках серого, на собственные векторы субполосных матриц косинус преобразования. Данный метод предложено применять для внедрения данных в цветное изображение на основании внедрения данных в его отдельную цветовую компоненту широко используемых при обработке изображений цветных пространств RGB, HSV и YCbCr. В работе предложены соотношения для оценивания погрешности цветного изображения, содержащего внедренные данные. Проведены вычислительные эксперименты, которые продемонстрировали, что скрытное субполосное внедрение данных в различные цветовые компоненты может вызывать существенно отличающиеся значения погрешностей изображений-контейнеров, а также, что учет частотных субполосных свойств изображений при скрытном внедрении данных на основе рассмотренного метода в цветовые компоненты изображений, представленных в цветовых пространствах RGB, HSV и YCbCr, позволяет достигнуть незначительных искажений (погрешности) цветных изображений-контейнеров.

**Ключевые слова:** скрытное внедрение, цветное изображение-контейнер, субполосные матрицы, собственные векторы, проекция изображения, погрешность