

**НАНОТЕХНОЛОГИИ В КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ  
НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ И НЕФТЕХИМИИ:  
АНАЛИЗ РЫНКА, СУЩЕСТВУЮЩИЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Татлыев Радик Джиганшевич**

*кандидат технических наук, доцент*

*заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело»,*

*Сургутского института нефти и газа (филиал),*

*Тюменский индустриальный университет (филиал ТИУ в г. Сургуте)*

*Сургут, Россия*

*E-mail: tatlyevrd@tyuiu.ru*

**Белов Дмитрий Александрович**

*Сургутский институт нефти и газа (филиал),*

*Тюменский индустриальный университет (филиал ТИУ в г. Сургуте)*

*Сургут, Россия*

*E-mail: bda\_2001@mail.ru*

*Предмет исследования: возможность повышения эффективности каталитических процессов на производстве при использовании наночастиц.*

*Объект исследования: нанотехнологии в каталитических процессах нефтепереработки и нефтехимии российского рынка.*

*Цель исследования: рассмотрение особенностей использования нанотехнологий в каталитических процессах нефтепереработки и нефтехимии.*

*Методы исследования: статистический и сравнительный анализ, аналитический обзор научно-исследовательской литературы, были использованы как аналитические материалы исследований нефтегазовой промышленности, так и последние наработки по результатам публикации конференций; статей из интернет-источников.*

*Основные результаты исследования: Описаны специфические свойства и эффекты применения нанокатализаторов, по сравнению с массивными аналогами. Приведены особенности организации нанокаталитических процессов. Проанализированы нанотехнологии, используемые на российских нефтеперерабатывающих заводах в рамках процессов каталитического крекинга, каталитического риформинга, гидроочистки. Дано общее представление о рынке нанокатализаторов, его объеме, тенденциях и перспективы дальнейшего развития. Определены проблемные вопросы, связанные с использованием нанотехнологий, поставками оборудования из-за рубежа, особенностями синтеза наночастиц. Проведенный в статье анализ позволяет сделать выводы о стратегических направлениях развития нанотехнологий в России. По результатам исследования были выявлены и недостатки технологии применения наночастиц, к ним относятся большие финансовые и временные затраты, необходимость импорта некоторых видов оборудования и технологий, отставание от наиболее продвинутых стран по глубине нефтепереработки.*

*Ключевые слова нанотехнологии, нанокатализатор, цеолиты, гидроочистка топлива, каталитический крекинг, каталитический риформинг, гидрокрекинг.*

**NANOTECHNOLOGIES IN CATALYTIC PROCESSES  
OF OIL REFINING AND PETROCHEMISTRY:  
MARKET ANALYSIS, EXISTING EXPERIENCE AND PROSPECTS**

**Radik D. Tatlyev**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Oil and Gas Business,  
Surgut Institute of Oil and Gas (branch),  
Tyumen Industrial University (TIU branch in Surgut)  
Surgut, Russia  
E-mail: tatlyevrd@tyuiu.ru*

**Dmitry A. Belov**

*Surgut Institute of Oil and Gas (branch),  
Tyumen Industrial University (TIU branch in Surgut)  
Surgut, Russia  
E-mail: bda\_2001@mail.ru*

*Purpose of research: is to consider the features of the use of nanotechnology in the catalytic processes of oil refining and petrochemistry.*

*Subject of research: the possibility of increasing the efficiency of catalytic processes in production using nanoparticles.*

*Object of research: nanotechnologies in catalytic processes of oil refining and petrochemistry of the Russian market.*

*Methods of research: statistical and comparative analysis, an analytical review of research literature, both analytical materials of oil and gas industry research and the latest developments based on the results of conference publications were used; articles from online sources.*

*Main results of research: the specific properties and effects of the use of nanocatalysts, compared with massive analogues, are described. The features of the organization of nanocatalytic processes are given. Nanotechnologies used at Russian oil refineries as part of the processes of catalytic cracking, catalytic reforming, and hydrotreating are analyzed. A general idea of the market of nanocatalysts, its volume, trends and prospects for further development is given. The problematic issues related to the use of nanotechnology, the supply of equipment from abroad, the peculiarities of the synthesis of nanoparticles are identified. The analysis carried out in the article allows us to draw conclusions about the strategic directions for the development of nanotechnologies in Russia. According to the results of the study, the shortcomings of the technology for the use of nanoparticles were also identified, these include large financial and time costs, the need to import certain types of equipment and technologies, lagging behind the most advanced countries in terms of the depth of oil refining.*

*Keywords nanotechnology, nanocatalyst, zeolites, fuel hydrotreating, catalytic cracking, catalytic reforming, hydrocracking.*

---

## **Введение**

Актуальность темы обусловлена важностью применения катализаторов в химических процессах подготовки и переработки нефти. Переход к наноразмерному состоянию катализаторов приводит к появлению уникальных свойств катализаторов и технологий, называемых, соответственно, нанокатализаторами и нанотехнологиями. Тесная связь этого процесса с другими с целью получения более чистого продукта на выходе обуславливает актуальность изучения и применения нанокаталитических технологий.

## Результаты и обсуждение

Катализаторы применяются во многих технологических процессах нефтеперерабатывающем и химических секторах. Объем мирового рынка катализаторов нефтепереработки оценивается в 3,7 млрд. долл. в 2021 г. Ежегодно прирост ожидается порядка 3% и к 2026 г. рынок вырастет до 4,3 млрд. долл. [1] Оценка динамики российского рынка катализаторов до 2030 г. представлена на рисунке 1.

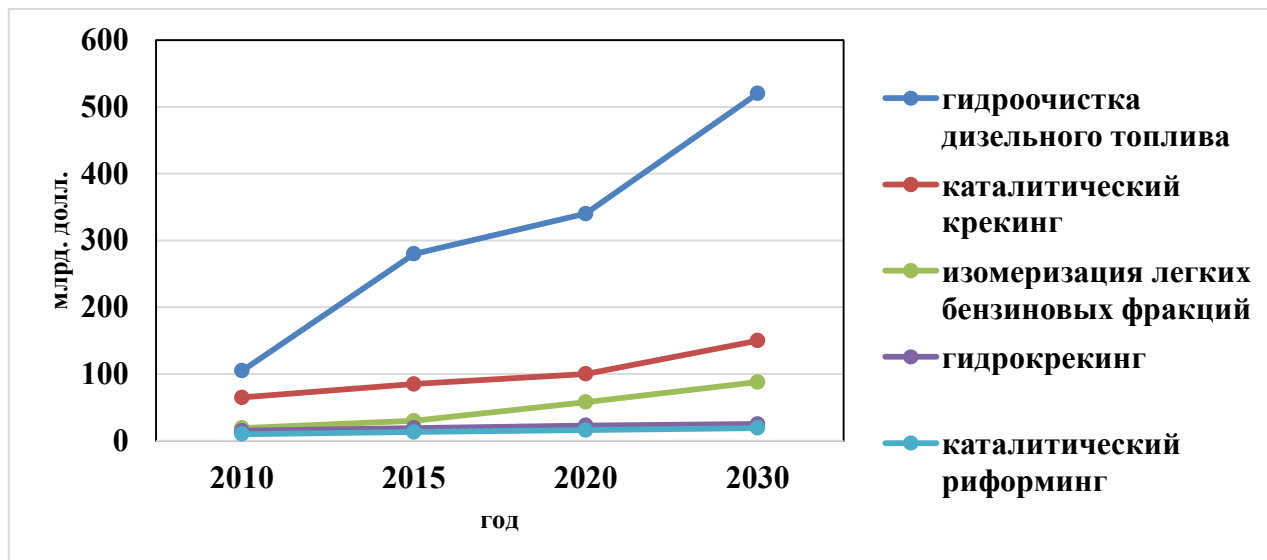


Рисунок 1 – Диаграмма «Оценка российского рынка катализаторов нефтепереработки до 2030 г., млрд. долл.» [1]

Смещение акцента на нанокатализаторы открывает новые возможности роста рынка. В начале исследования необходимо выявить ключевые отличия понятий «катализатор» и «нанокатализатор».

Катализатором, как известно, является вещество, при участии которого происходит ускорение химической реакции, не расходуя в итоге. Химические реакции с использованием катализаторов называются каталитическими, а сам процесс – катализом.

Первым отличием «нанокатализатора» от «катализатора» является наноразмерность частиц. Наноразмерностью считается одиночный размер частиц меньше 100 нанометров (миллиардных долей метра). С уменьшением размеров частицы увеличивается доля поверхностных атомов. Наночастицы состоят из сравнительно небольшого количества атомов – 106 и менее. У наночастиц почти все атомы находятся на поверхности, поэтому их химическая активность очень велика. Наночастицы могут существовать как нульмерные (0Д) объекты – наноточки, или квантовые точки. Однако существование наночастиц более устойчиво в объединениях. Это могут быть 3Д объединения – кластеры размером 10 нм, в которых содержится до 1000 атомов, плоские двумерные (2Д) объекты – нанопленки; линейные одномерные (1Д) объекты – нанонити, или нанопроволоки. Сложное ячеистое строение характерно для нанотрубок и нанопористых материалов. В любом случае, поверхностная площадь наночастиц или их объединений в гораздо больше, чем у массивного аналога, в котором большая часть атомов находится в объеме и недоступна реагирующим молекулам [2].

Повышенная каталитическая активность наночастиц связана не только с долей поверхностных атомов, но и с низко координированным состоянием частиц, в котором они проявляют максимальную каталитическую активность. Рост активности также связывают с увеличением доли наиболее каталитически активных атомов на ребрах, узлах, ступеньках кристаллических плоскостей по отношению к доле атомов на плоских гранях, т.к. они имеют избыточную поверхностную энергию и больший химический потенциал [2]. В наночастицах электроны ведут себя как квантовые объекты, а происходящие эффекты называют квантово-

размерными, например, квантовые микрочастицы могут преодолеть потенциальный барьер даже с энергией меньшей высоты барьера, тем самым демонстрируют туннельный эффект. Поэтому нанокатализаторы обладают физическими и химическими свойствами, которыми не обладают их массивные аналоги. Наночастицы многих веществ демонстрируют удивительные свойства, нарушая многие законы макроскопической физики.

Организация нанокаталитических процессов также имеет отличия. Благодаря свойствам структурности и агрегатности, нанокатализ технологически приобретает специфические свойства позволяющие удерживать наночастицы от слипания и потери их уникальных свойств, что особенно актуально для технологий очистки нефти для производства нефтепродуктов с более высокими экологическими свойствами [3].

Можно выделить следующие преимущества нанокатализаторов:

- высокая селективность и активность нанокатализаторов;
- большая экономическая эффективность благодаря замене массивных аналогов катализаторов на специально изготовленные наноразмерные катализаторы, улучшающие химическую активность и способствующие снижению затрат на процесс;
- свойства каталитических мембран, способствующие очищению и удалению нежелательных молекул из углеводородов, которые поддаются контролю путем изменения размера пор и мембранных характеристик [4].

Преимущества нанокатализаторов стимулируют обновление продуктов на рынке. Ежегодно обновляется порядка 5% ассортимента катализаторов с использованием нанотехнологий. Рост рынка также стимулирует увеличение инвестиций в нефтеперерабатывающие заводы и увеличение спроса на топливо с более высоким октановым числом. Лидерами на рынке являются США, Китай, Япония, Канада, Германия. Наибольшим потреблением отличается Азиатско-Тихоокеанский регион, в котором доминируют Китай и Индия. Если рассматривать рынок с позиции технологических процессов, то структура мирового рынка катализаторов представлена на рисунке 2.

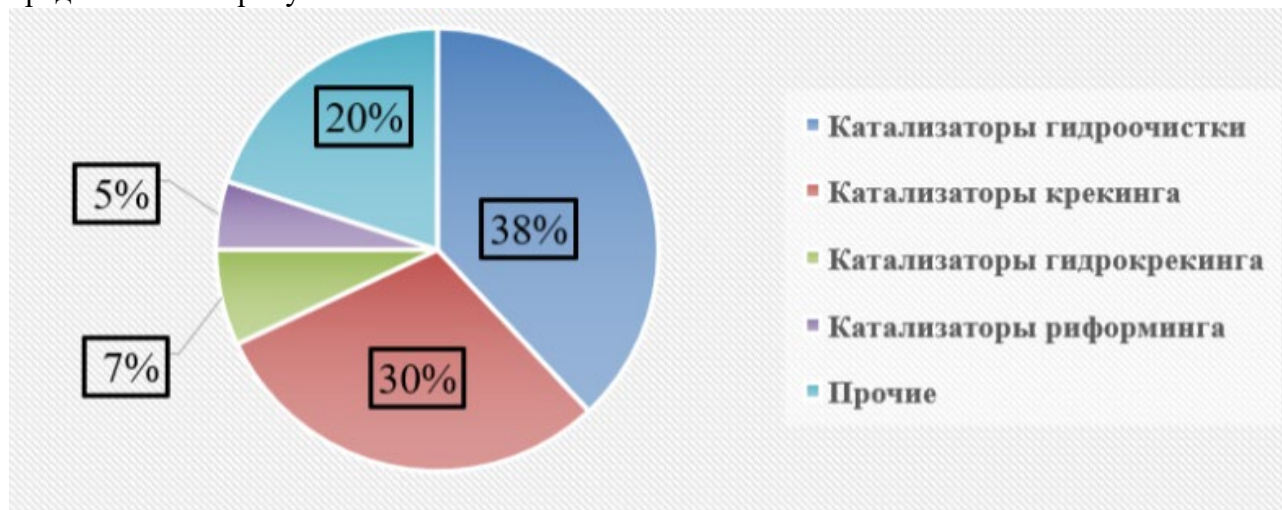


Рисунок 2 – Диаграмма «Структура мирового рынка катализаторов»

Если рассматривать рынок по ингредиентам, то на сегмент цеолитов приходится 52% рынка. Это связано с тем, что они используются в наиболее распространенных процессах нефтепереработки (рис. 3).

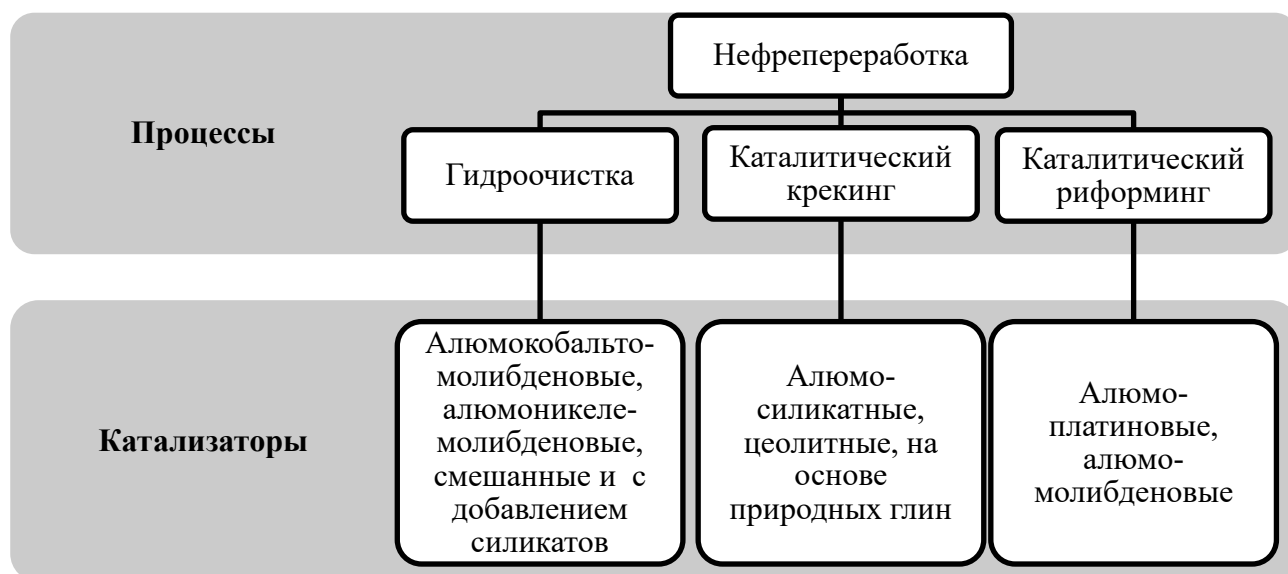


Рисунок 3 – Катализаторы процессов нефтепереработки

Для оптимизации катализаторов используют нанотехнологии. Важное направление повышения эффективности каталитических свойств – модификация наночастицами металлов. Их используют в различных процессах нефтепереработки. Например, в катализаторах гидрогенизационных процессов нефтепереработки применяются:

- наночастицы металлов VIII группы: никеля, кобальта, платины, палладия обладающие дегидрирующими свойствами;
- оксиды или сульфиды VI группы: молибден, вольфрам, иногда хром способствуют адсорбции, хемосорбции, гомолитическому распаду;
- термостойкие носители с развитой удельной поверхностью и высокой механической прочностью могут быть нейтральными (оксиды алюминия, кремния, магния и др.) или обладать кислотными свойствами (синтетические аморфные и кристаллические алюмосиликаты и цеолиты, магний- и цирконийсиликаты, фосфаты) с дополнительными изомеризующими и расщепляющими (крекирующими) свойствами.

Модификация нанопорошков металлов для промотирования цеолитсодержащих катализаторов позволяет более эффективно их использовать в процессах каталитического крекинга. Оптимальные условия соблюдаются, когда кристаллический цеолитовый компонент равномерно распределен виде тонко диспергированных кристаллов (менее 10 мкм) в алюмосиликатной матрице, которая способствует отведению тепла.

Цеолиты могут модифицироваться наночастицами из металлоорганических солей (например, из 2-этилгексаноата цинка или никеля). Оптимизируется такой катализатор использованием макропористых цеолитов и интеркалированных глин с оптимизированным соотношением числа сильных протонов и мягких кислот Льюиса и введением в матрицу «ловушек» для присутствующих в сырье ионов никеля, ванадия, серы [5].

Наноструктурированные гибридные материалы на основе пористых полимеров (резолы, полиароматические каркасы) легки в модификации поверхности и введении дополнительных функциональных групп, стабильны при температуре до 400°C, с регулируемой пористостью перспективны для иммобилизации наночастиц металлов, сульфидов и их комплексов.

В широком круге процессов: реакциях гидрирования, дегидрирования, карбонилирования, диспропорционирования, гидродегаллоидирования и пр. значительную роль играют катализаторы с нанесенными платиновыми и палладиевыми системами, благодаря эффективному применению при относительно низких температурах и в широком диапазоне значений pH. Содержание активного компонента в таких катализаторах, не превышает 5% массовой доли. В настоящее время известны и появляются все новые методики приготовления низкопро-

центных катализаторов, позволяющие целенаправленно управлять размером, микроструктурой и характером распределения наночастиц благородных металлов по величине зерна [6].

Специальными нанотехнологическими приемами при синтезе многих катализаторов удастся оптимизировать их морфологию и текстуру. Например, синтезируя цеолиты с ребрышками толщиной около 50 нм можно увеличить активность и срок межрегенерационного пробега цеолитных катализаторов, применяемых для переработки попутного газа – наиболее перспективной сырьевой базы отечественной нефтехимии. Недоиспользование данного ресурса оценивается ежегодными потерями в 180 млрд.руб. и увеличением выбросов в атмосферу CO<sub>2</sub> примерно 50 млн.т. [7].

Таблица 1

## Анализ процессов нефтепереработки и нефтехимии в России

| Процессы                          | Существующие нанотехнологии  | Проблемы  | Возможности   | Угрозы  |
|-----------------------------------|--|---|---|---|
| <b>Гидроочистка ДТ</b>            | Методы по управлению пористой структурой носителей, технологии синтеза активного компонента, технологии окислительной сероочистки  | Импортируемое оборудование  | Введение в эксплуатацию новой технологии производства катализаторов путем окисления; появление новых типов носителей, (наноструктурированной двуокиси титана) | Недостаток инвестиций, санкции                        |
| <b>Каталитический крекинг</b>     | Катализаторы, имеющие стойкость к отравлению металлами для переработки мазута, синтез цеолитов разных типов (с широкими мезопорами, для крекинга тяжелого сырья и цеолитов для процесса типа «миллисеконд»), модификация матрицы | Необходимость обновления оборудования, зависимость от импортного оборудования | Увеличение мощностей, за счет распространения микросферических алюмооилкатных цеолитсодержащих катализаторов со средним диаметром частиц от 10 до 150 мкм     | Недостаток инвестиций, санкции на импорт оборудования |
| <b>Каталитический риформинг</b>   | Нанокатализаторы для установок с движущимся слоем катализатора, нанокатализаторы для получения высокооктанового числа на мягких режимах проведения процесса, катализаторы для получения водорода                                 | необходимость обновления оборудования, зависимость от импортного оборудования | Масштабная замена действующих установок на более современные комплексы; увеличение мощностей связано с ростом числа установок на окисдных катализаторах       | Недостаток инвестиций, санкции на импорт оборудования |
| <b>Гидрокрекинг</b>               | Технологии по формированию в растворе биметаллических комплексных соединений около 1 нм  | импорт оборудования   | Рост количества установок   | Недостаток инвестиций, санкции на импорт оборудования |
| <b>Переработка попутного газа</b> | Нанотехнологии по оптимизации морфологии и текстуры цеолитов, использование процесса Фишера-Тропша для получения синтез-газа и др. ценных продуктов  | Удаленные, малодебитные месторождения, отсутствие инфраструктуры              | Внедрение дешевых малогабаритных установок  | Недостаток инвестиций, санкции на импорт оборудования |

Для синтеза нанокатализаторов необходимо получение нанопорошков с узким гранулометрическим составом (т.е. с узкой функцией распределения по размерам), а также в предотвращении возможной агломерации образующихся частиц. Для этого необходимы соответствующие технологии. Производство наночастиц может быть организовано сухим синтезом, мокрым синтезом и химическим размолом. В первых двух методах наночастицы

создаются из атомных прекурсоров (веществ предшественников) восходящим способом. Химический разлом производится за счет дробления и измельчения более крупных. Мокрый синтез включает в себя преципитацию и методику золь-гель, а сухой синтез – получение наночастиц горением, печным синтезом, плазмохимией. Анализ существующих российских технологий, их перспектив и проблем представлен в таблице 1 [8].

### **Заключение и выводы**

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что Россия обладает потенциалом в нанотехнологиях нефтепереработки и нефтехимии, который в ближайшие несколько лет будет развиваться каждый год все большими темпами. Кроме того, она обладает собственным научно-исследовательским потенциалом, способствующим не только перенимать чужой опыт, но и получить собственные инновационные решения. К недостаткам относятся большие финансовые и временные затраты, необходимость импорта некоторых видов оборудования и технологий, отставание от наиболее продвинутых стран по глубине нефтепереработки. В настоящее время по программам импортозамещения в РФ сотрудники производств нефтепереработки совместно с ведущими вузами страны разрабатывают возможные технологические решения по использованию нанотехнологий в каталитических процессах нефтехимии без применения зарубежного оборудования. Приоритет делается на потенциал развития Западно-Сибирского района.

Стратегические цели нефтепереработки заключаются в наращивании собственного потенциала, увеличению установок переработки и обновлению парка оборудования. Угрозы могут быть связаны с недостатком инвестиций и санкциями.

### **Литература**

1. The Refinery Catalysts – Global Market Trajectory & Analytics report to Research and Markets – Direct text // PRNewswire – 2022.
2. Чижков, М. Ф. Классификация нанокластеров. Наночастицы / М. Ф. Чижков. – Текст : электронный. – URL : <https://pandia.ru/text/80/170/57969.php> (дата обращения: 20.02.2023).
3. Солодова, Н. Л. Наноматериалы и нанотехнологии в нефтепереработке / Н. Л. Солодова, Н. А. Терентьева. – Текст: непосредственный // Вестник Казанского технологического университета. – 2018. – С. 209-216.
4. Ершов, Д. С. Современное состояние и тенденции развития процесса каталитического крекинга / Д. С. Ершов, А. Р. Хафизов, И. А. Мустафин, К. Е. Станкевич, А. В. Ганцев, Г. М. Сидоров. – Текст: непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12-2. – С. 282-286.
5. Яковлев, В. А. III Российский конгресс по катализу РОСКАТАЛИЗ-2017 / В. А. Яковлев, В. В. Каичев, М. А. Ключа. – Текст: непосредственный // Каталитический бюллетень. – 2017. – №. 83. – С. 3-48.
6. Зейналов, Э. Б. Нанокатализ. Акценты / Э. Б. Зейналов, Э. Р. Гусейнов. – Текст : электронный // Азербайджанский химический журнал. – 2018. – № 2. – С. 15-17. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/nanokataliz-aktsenty> (дата обращения: 20.02.2023).
7. Принц, В. А. Анализ существующих технологий, технических решений по утилизации нефтяного газа / В. А. Принц, А. Е. Принц. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 52 (342). – С. 88-91.
8. Дорожная карта «Использование нанотехнологий в каталитических процессах нефтепереработки». – Текст : электронный. – URL : <https://www.nanonewsnet.ru/articles/2010/dorozhnaya-karta-ispolzovanie-nanotekhnologii-v-kataliticheskikh-protsessakh-neftepere> (дата обращения: 20.02.2023).