

**М. Ю. Антонова, А. Р. Давлетшин, Р. Г. Теляшев,
Н. В. Лыжина**
**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ Ni-AL СЛОИСТЫХ
ДВОЙНЫХ ОКСИДОВ**

Ключевые слова: Слоистые двойные оксиды, сверхкритический флюид, фазовый состав, каталитический крекинг, азотная порометрия, газовая хроматография.

В настоящее время в России положение с производством катализаторов, соответствующих мировому уровню качества, близко к критическому, а на импортные поставки приходится более 90 % общего объема сырьевого рынка для производства катализаторов. В работе исследована структура и каталитическая активность синтезированных слоистых двойных оксидов Ni-Al в процессе крекинга алканов линейного строения. Для анализа газообразных и жидких продуктов были использованы газовая хроматография, хромато-масс-спектрометрия, элементный анализ, ИК-спектроскопия. Для изучения состава слоистых двойных оксидов использовался рентгеноструктурный и рентгенофлуоресцентный анализ, для определения удельной поверхности – анализатор удельной поверхности. Двойные оксиды никеля и алюминия были синтезированы методом соосаждения. По данным рентгеноструктурного анализа структура полученных слоистых гидроксидов никеля и алюминия соответствуют строению брусита и гидротальцита. Термообработка слоистых двойных гидроксидов никеля и алюминия при 450 °C и выше в токе азота ведёт к увеличению удельной общей поверхности с 59 до 169 м²/г. Полученные двойные оксиды никеля и алюминия состоят преимущественно из октаэдрических структур с размерами кристаллитов более 4 нм. При крекинге длинноцепочных линейных алканов в присутствии двойных оксидов никеля и алюминия со слоистой структурой в конечных продуктах увеличивается доля изо-алканов по сравнению с катализом в присутствии промышленного катализатора крекинга. Степень превращения алканов в процессе крекинга в присутствии слоистого двойного оксида никеля и алюминия достигает 97,5 %. После крекинга слоистые двойные оксиды Ni-Al сохраняют свою структуру и состав.

**M. Yu. Antonova, A. R. Davletshin, R. G. Telyashev,
N. V. Lyzhina**
STUDY OF THE STRUCTURE AND CATALYTIC ACTIVITY OF Ni-AL LAYERED DOUBLE OXIDES

Keywords: Layered double oxides, supercritical fluid, phase composition, catalytic cracking, nitrogen porosimetry, gas chromatography.

At present, the situation with the production of catalysts corresponding to the world quality level in Russia is close to critical, and import supplies account for more than 70% of the total volume of the country's catalyst market. The work investigates the structure and catalytic activity of synthesized layered double oxides Ni-Al in the process of cracking linear alkanes. Gas chromatography, chromatograph mass spectrometry, elemental analysis, IR spectroscopy were used to analyze gaseous and liquid products. X-ray diffraction and X-ray fluorescence analysis were used to study the composition of layered double oxides, and a specific surface analyzer was used to determine the specific surface. Double oxides of nickel and aluminum were synthesized by the coprecipitation method. According to X-ray diffraction analysis, the structure of the obtained layered hydroxides of nickel and aluminum corresponds to the structure of brucite and hydrotalcite. Heat treatment of layered double hydroxides of nickel and aluminum at 450 °C and higher in a nitrogen flow leads to an increase in the specific total surface area from 59 to 169 m²/g. The resulting double oxides of nickel and aluminum consist predominantly of octahedral structures with crystallite sizes greater than 4 nm. During cracking of long-chain linear alkanes in the presence of double oxides of nickel and aluminum with a layered structure, the proportion of iso-alkanes in the final products increases compared to catalysis in the presence of an industrial cracking catalyst. The degree of conversion of alkanes during cracking in the presence of layered double oxide of nickel and aluminum reaches 97.5%. After cracking, the layered double oxides Ni-Al retain their structure and composition.

Введение

На сегодняшний день основные исследования в области катализа связаны с решением проблемы увеличения активности и удельной поверхности отечественных каталитических систем вторичных процессов переработки углеводородного сырья [1,2]. Целый ряд высокоэффективных катализаторов, использующихся на российских нефтеперерабатывающих заводах, например, в процессах гидродепарафинизации, гидрокрекинга, гидроочистки, либо не производятся в стране, либо их физико-химические показатели не позволяют обеспечить производство топлива, соответствующего высоким требованиям по защите окружающей среды [3,4,5]. На сегодняшний день в Российской Федерации доля импортных поставок катализаторов составляет порядка 60 % от общего объема рынка,

основными поставщиками ранее были такие известные фирмы, как Grace GmbH (30 %), BASF SE (20 %) и Albemarle Corporation (5 %), а в настоящее время Hainhua Industry Group (Китай) [6,7]. Для создания высокоэффективных отечественных катализаторов крайне необходимо проведение всесторонних научно-поисковых исследований [8].

Актуальными направлениями развития нефтеперерабатывающей промышленности остаются: улучшение эксплуатационных показателей производимых моторных топлив с приближением их к современным европейским стандартам качества; наращивание глубины переработки традиционного углеводородного сырья за счет внедрения новейших технологий; интенсификация сроков обновления ввода новых мощностей и замены устаревших технологий [9,10].

Базовые процессы на нефтеперерабатывающих предприятиях основаны на крекинге углеводородного сырья в ценные компоненты топлив либо в востребованное сырьё нефтехимического комплекса [11]. В качестве катализаторов реакций крекинга углеводородов в настоящее время используются цеолиты [12,13,14]. В классических катализаторах крекинга обычно содержится около 20 % цеолита, а 80 % приходится на матрицу или связующее [15]. Путем включения в матрицу цеолитов различных центров, можно воздействовать на селективность каталитического крекинга [16,17]. Наиболее применяемые в катализе цеолиты типа А (LTA), X (FAU), Y (FAU) и ZSM-5 (MFI), отличающиеся соотношением Si/Al, количеством катионов, приходящихся на элементарную ячейку, а также ее строением и размером пор (диаметр каналов варьируется от 0,55 до 0,45 нм, объем пор - от 0,15 до 0,35 м²/г) [18,19]. Катализаторы крекинга получают методом ионного обмена катионов металлов в структуру цеолита с последующей его стабилизацией и смешением цеолита со связующим. Полученная композиция из цеолита и связующего после термической обработки образует каталитическую систему [20]. К основным стадиям получения относятся модифицирование цеолита методом ионного обмена, стабилизация цеолита, введение цеолита в алюмосиликатную матрицу, промывка, формование и сушка [21,22].

В качестве альтернативы катализаторам на основе синтетических цеолитов могут быть рассмотрены оксиды со слоистой структурой, представляющие собой структуры. В оксидах со сложной слоистой структурой анионы, располагающиеся в межслоевом пространстве перекрывают их положительный заряд [23,24]. Стоит отметить, что многие цеолитные системы, сульфиды, некоторые разновидности глинистых минеральных соединений, имеют схожую слоистую структуру. Однако только двойные оксиды, обладающие слоистой структурой, имеют необходимые параметры для осуществления контролируемого синтеза каталитических систем. Структура слоистых двойных оксидов смешанного фазового состава подходит для интеркалирования большинства ионов металлов. Отличительная особенность смешанных двойных оксидов, обладающих слоистой структурой, заключается в зависимости количества интеркалированных в межслоевое пространство анионов от соотношения в них катионов металлов M^{2+}/M^{3+} , которое контролируется при синтезе, что позволяет варьировать концентрацию каталитически активных центров в их матрице [25,26]. Основным способом получения слоистых двойных оксидов является метод соосаждения, заключающийся в совместном осаждении растворов металлов с раствором щелочи при заданном значении pH.

Работа посвящена синтезу и исследованию каталитической активности Ni-Al слоистых двойных оксидов в реакциях крекинга алканов.

В последние десятилетия среди исследователей, работающих в области катализа особый интерес вызывают слоистые двойные оксиды в первую

очередь, за счет развитой удельной поверхности, высокой концентрации активных центров, возможности контролируемого изменения соотношения трёх- и двухвалентных катионов металлов, а также простоты и дешевизны получения.

Материалы и методы

Получение двойных оксидов никеля и алюминия слоистой структуры осуществляли в соответствии с известными методиками, подробно описанными в работах исследователей [10, 11]. Так, одномолярные водные растворы нитратов никеля и алюминия при соотношении катионов металлов M^{2+}/M^{3+} равном соответственно 0,3 доводили до равного объема раствора NaOH и приливали совместно с двухмолярным раствором щелочи к дистиллированной воде в объеме 0,1 л, предварительно подогретой на водяной бане до температуры 80 °С. Далее полученный раствор интенсивно перемешивали с постоянной скоростью 300 об/мин при pH от 8 до 10, выделенный осадок промывали на центрифуге, затем сушили в сушильном шкафу. На завершающем этапе слоистые двойные гидроксиды термобрабатывали в муфельной печи в течении 3 часов при температуре более 500 °С до получения двойных оксидов Ni-Al.

Исследования каталитической активности слоистых двойных оксидов Ni-Al проводились на лабораторной каталитической установке (рис. 1) при температуре около 500 °С и давлениях до 0,5 МПа. Исходная смесь была представлена алканами линейного строения состава C₁₁-C₂₂ в равном соотношении. Для сравнительного анализа каталитической активности синтезированного слоистого двойного оксида Ni-Al в качестве аналога был выбран промышленный катализатор крекинга, представляющий собой порошок с размерами частиц от 40 до 700 нм, состоящий из кристаллических фаз цеолита, каолинита, иллита.

Каталитическая установка (рис. 1) состоит из реакторного блока оснащённым трубчатым пустотелым металлическим реактором (R-101) с размещенном в нем катализатора в виде стационарном слоя. Реактор обогревается раздвижным двухсекционным нагревателем (H-101). Установка оснащена обогреваемой емкостью смешения сырьевых и газовых потоков (PH-101) перед подачей в реактор, а также системой автоматического формирования потока жидкости (P-104) и газа (MFC-101). Блок разделения продуктов состоит из холодильника (C-101) и сепаратора (S-101), а также контроллером давления (BPR-101).

Термический анализ слоистого двойного гидроксида Ni-Al был выполнен с помощью синхронного термического анализатора STA 6000 PerkinElmer.

Размер агрегатов слоистых двойных гидроксидов и оксидов определялся методом рассеяния и детектирования отраженного/преломленного лазерного света на лазерном анализаторе распределения размеров частиц Horiba LA-950.

Фазовый состав приготовленных смешанных двойных оксидов никеля и алюминия исследовался на

рентгеновском дифрактометре производства Bruker Axs diffractometer в диапазоне углов 2θ от 5° до 70° , с шагом $0,02^\circ$ и временем съемки 1 с/шаг. Во время анализа использовался стандартный держатель полиметилметакрилатовый, включающий образец двойных оксидов, который вращался со скоростью 30 об/мин в своей плоскости.

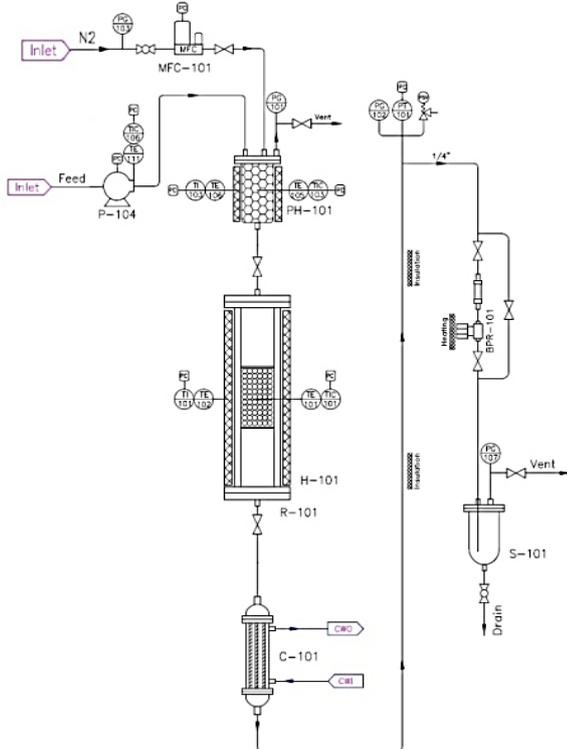


Рис. 1 – Лабораторно-каталитическая установка

Fig. 1 – Laboratory-catalytic installation

Анализ элементного состава смешанных двойных оксидов выполнялся на рентгенофлуоресцентном спектрометре фирмы Shimadzu (Япония) EDX-800HS2.

Изучение общей удельной поверхности смешанных двойных оксидов проводили с помощью метода термодесорбции N_2 на приборе Nova фирмы «Quantachrom» (США).

Каталитическую активность приготовленных двойных оксидов никеля и алюминия оценивали по данным о составе исходной смеси неразветвлённых парафинов и продуктов катализа полученным с помощью газовой хроматографии с на хроматографе фирмы PerkinElmer «Clarus 680» (США) оснащённым масс-спектрометрическим детектором SQ8 MS.

Обсуждение результатов

По данным термического анализа двойного гидроксида Ni-Al в интервале температур от 80 до $210^\circ C$ происходит удалению физически связанной (адсорбированной) воды; в интервале от 210 до $390^\circ C$ выделение воды межслоевого пространства; в интервале от 390 до $610^\circ C$ дегидроксилирование бруситоподобных слоев; в интервале от 610 до $850^\circ C$ декарбонизация слоистой структуры (рис. 2).

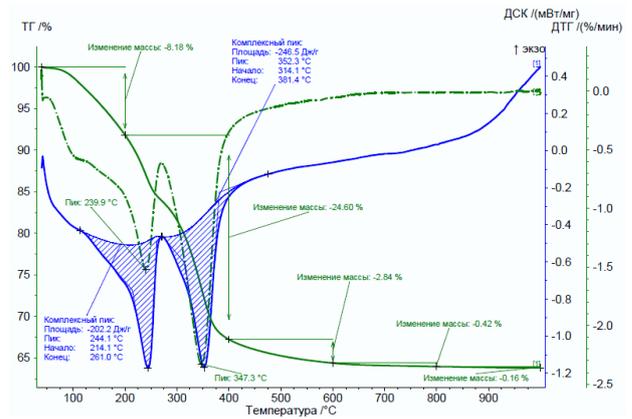


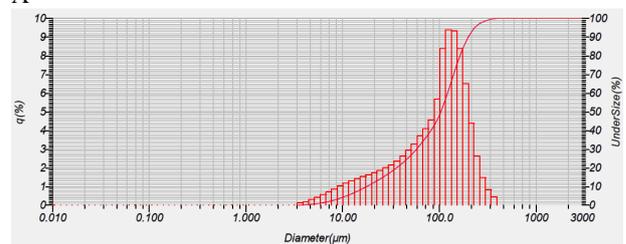
Рис. 2 – Термический анализ Ni-Al слоистого двойного гидроксида

Fig. 2 – Thermal analysis of Ni-Al layered double hydroxide

По данным анализа размеров агрегатов (рис. 3) порядка 65 % конгломератов смешанных гидроксидов никеля и алюминия слоистой структуры характеризуются размерами в диапазоне от 150 до 800 нм, а 25 % частиц обладают размерами до 90 нм. После термообработки гидроксидов никеля и алюминия, при получении двойных оксидов со слоистой структурой порядка 55 % конгломератов имеют размеры в диапазоне 8-100 нм, а 35 % от 100 до 800 нм.

Кристаллическая фаза двойных гидроксидов никеля и алюминия по данным рентгеноструктурного анализа схожа со структурой гидротальцита (рис. 4).

А



Б

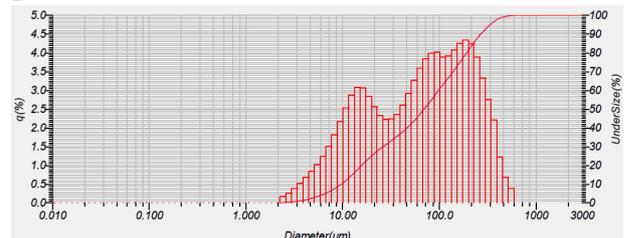


Рис. 3 – Размер агрегатов: А) слоистого двойного гидроксида Ni-Al; Б) слоистого двойного оксида Ni-Al

Fig. 3 – Size of aggregates: A) layered double Ni-Al hydroxide; B) layered double Ni-Al oxide

Размер кристаллитов в смешанных оксидах никеля и алюминия составил 6,7 нм. Рентгенограмма полученного смешанного оксида со слоистой структурой содержит оксид никеля с малыми значениями параметров, описывающих кристаллическую решетку, что обусловлено

замещением некоторого количества катионов Ni^{2+} на Al^{3+} . Также в составе слоистой структуры присутствует фаза смешанных оксидов переменного состава и аморфная фаза. Замена катионов никеля на катионы алюминия в слоистой структуре составляет 15 %.

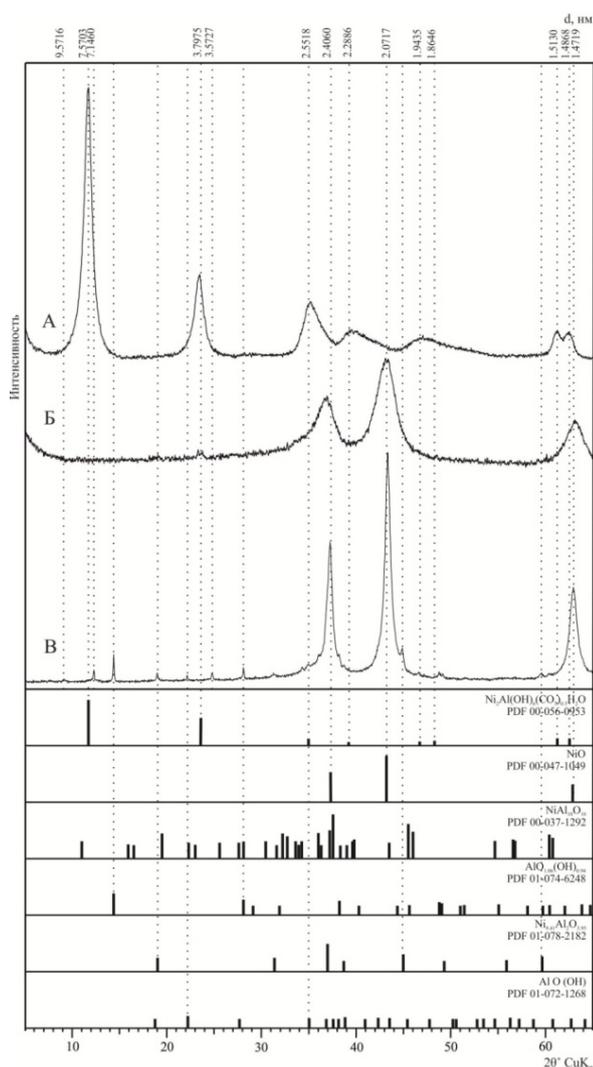


Рис. 4 – Рентгенограмма: А) двойного гидроксида никеля и алюминия со слоистой структурой; Б) двойного оксида никеля и алюминия со слоистой структурой; В) двойного оксида никеля и алюминия со слоистой структурой после катализа.

Fig. 4 - X-ray diffraction of: A) double nickel and aluminium hydroxide with layered structure; B) double nickel and aluminium oxide with layered structure; C) double nickel and aluminium oxide with layered structure after catalysis

Средний размер кристаллитов в полученных смешанных оксидных составляет 4,2 нм. Смешанная оксидная фаза никеля и алюминия представлена схожими с бунзенитом октаэдрическими структурами с малым содержанием шпинельных включений. Согласно рентгеноструктурному анализу (рис. 3), образцы слоистых двойных оксидов после катализа сохраняют свою исходную структуру.

Расчет удельной поверхности проводили по методу Брунауэра-Эммета-Теллера (табл. 1).

Таблица 1 - Площади удельной поверхности

Table 1 - Specific surface areas

Образец	м ² /г
Смешанный гидроксид никеля и алюминия со слоистой структурой	58
Смешанный оксид никеля и алюминия со слоистой структурой, прокаленный в токе кислорода	158
Смешанный оксид никеля и алюминия со слоистой структурой, прокаленный в токе азота	169
Промышленный катализатор крекинга	317

При прокаливании слоистого двойного гидроксида Ni-Al увеличивается площадь удельной поверхности более чем в 3 раза.

Согласно составу конечных продуктов крекинга алканов линейного строения состава $C_{11}-C_{22}$ (рис. 5) образцы слоистого двойного оксида Ni-Al демонстрируют наибольшую селективность в отношении образования ароматических углеводородов (УВ), алкенов и изо-алканов (i-алканы) аналогично промышленному катализатору.

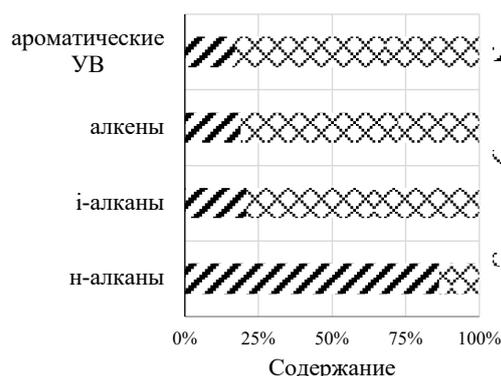


Рис. 5 – Состав продуктов крекинга алканов линейного строения (1) в присутствии слоистого двойного оксида Ni-Al (2) и промышленного катализатора крекинга (3)

Fig. 5 – Composition of cracking products of linear structure alkanes (1) in the presence of layered Ni-Al double oxide (2) and industrial cracking catalyst (3)

Степень превращения исходной смеси алканов в процессе крекинга в контрольном эксперименте (1) составило 43,7 %, в присутствии промышленного катализатора (3) – 82,4 %, в присутствии слоистого двойного оксида Ni-Al (2) – 97,5 %.

По данным рентгенфлуоресцентного анализа содержание никеля в слоистых двойных оксидах составило 86 %, алюминия – 14 % (рис. 6). После катализа данное соотношение осталось прежним, что свидетельствует об отсутствии процессов превращения фаз и устойчивости смешанных оксидов никеля и алюминия со слоистой структурой в условиях каталитического крекинга.

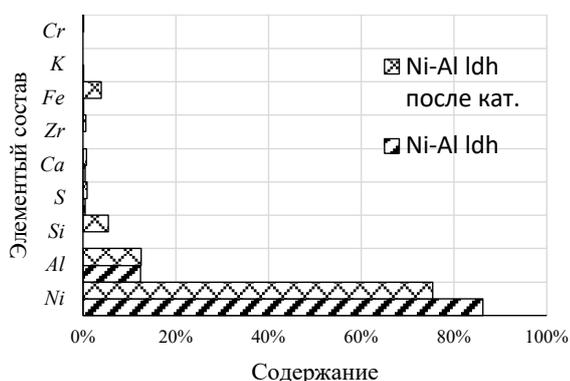


Рис. 6 – Элементный состав смешанных двойных оксидов никеля и алюминия (1) до и (2) после каталитического крекинга

Fig. 6 – Elemental composition of mixed double oxides of nickel and aluminium (1) before and (2) after catalytic cracking

Присутствие в составе смешанных двойных оксидов никеля и алюминия незначительного количества хрома, кремния и железа после катализа связано с тем, что реактор изготовлен из легированной стали, а удерживающие слои катализатора выполнены из кремния. Присутствие таких элементов, как сера, цирконий, кальций, калий, связано с примесью исходных прекурсоров, применяемых для приготовления двойных гидроксидов никеля и алюминия и последующего получения на их основе смешанных оксидов со слоистой структурой.

Заключение

Изучена слоистая структура и каталитическая активность синтезированных смешанных двойных оксидов никеля и алюминия в процессе крекинга парафиновых углеводородов. Полученные смешанные двойные гидроксиды из водных растворов нитратов катионов Ni^{2+}/Al^{3+} в соотношении равном 0,3 имеют структуру схожую с гидротальцитом. Термообработка двойных гидроксидов при температурах выше 500 °C ведёт к удалению воды и дегидроксилированию межслоевого пространства с образованием смешанных двойных оксидов никеля и алюминия со слоистой структурой в форме бунзенитоподобных октаэдрических структур. Последующее прокалывание оксидов в токе азота увеличивает значение удельной площади поверхности агрегатов до 169 м²/г. Использование при крекинге алканов слоистых двойных оксидов Ni-Al увеличивает их конверсию на 15,1 % по сравнению с промышленным катализатором, с увеличением в конечных продуктах доли ароматических углеводородов (УВ), алкенов и изо-алканов.

В настоящее время в России положение с производством катализаторов, соответствующих мировому уровню, близко к критическому. Ведущие лицензиары каталитических технологий переработки углеводородов совершенствуют технологии получения высокоактивных катализаторов за счет синтеза новых носителей, оптимизации химического состава. Разработка научных основ синтеза новых

каталитических систем позволит создавать технологии получения высокотехнологичных продуктов с высоким дисконтом рыночной стоимости от себестоимости и использования катализаторов для получения топлив, соответствующих современным высоким стандартам качества.

Литература

1. Р. П. Закиева и др., Химия и технология топлив и масел 57, 5, 740-745 (2021).
2. С. М. Петров, А. И. Лахова, Химия и технология топлив и масел 6, 15-20 (2024).
3. Е. Г. Зайцева, Р. И. Гилязев, Н. В. Котова, С. М. Петров, Н. Ю. Башкирцева, Научный журнал Российского газового общества, 2, 106-113 (2024).
4. Е. Г. Zaitseva, A. G. Safulina, S. M. Petrov, Egyptian Journal of Petroleum 33, 2, 315-327 (2024).
5. E. G. Zaitseva et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 60, 3, 551-558 (2024).
6. E. G. Zaitseva, S. M. Petrov, N. Y. Bashkirtseva, Chemistry and Technology of Fuels and Oil 1-9 (2024).
7. S. M. Petrov et al., Petroleum 10, 2, 216-223 (2024).
8. И. Д. Аглиуллина, М. Ю. Антонова, Е. Г. Зайцева, С. М. Петров, Г. П. Каюкова, Н. Ю. Башкирцева, Вестник технологического университета 27, 6, 23-29 (2024).
9. Е. Г. Моисеева, Р. Р. Максумова, С. М. Петров, А. Г. Сафиуллина, Химия и технология топлив и масел. 1, 25-28 (2023).
10. E. G. Moiseeva et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 59, 1, 28-32 (2023).
11. R. R. Zakieva, S. M. Petrov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils 59, 1, 69-74 (2023).
12. S. M. Petrov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils 59, 1, 65-68 (2023).
13. И. Д. Аглиуллина, Е. Г. Зайцева, С. М. Петров, Вестник технологического университета 26., 8, 52-57 (2023).
14. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils 57, 6, 885-890 (2022).
15. S. M. Petrov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils 57, 6, 895-900 (2022).
16. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, N. Y. Bashkirtseva, Chemistry and Technology of Fuels and Oils 58, 1, 1-5 (2022).
17. E. G. Moiseeva et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 58, 2, 283-288 (2022).
18. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils 58, 2, 297-301 (2022).
19. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, N. Y. Bashkirtseva, Chemistry and Technology of Fuels and Oils 58, 1, 1-5 (2022).
20. А. И. Лахова, С. М. Петров, Химия и технология топлив и масел 2, 27-30 (2022).
21. A. V. Vakhin et al., Processes 9, 1, 158 (2021).
22. S. M. Petrov et al., Processes 9, 2, 256 (2021).
23. A. I. Lakhova et al., Processes 9, 3, 553 (2021).
24. S. M. Petrov et al., Processes 9, 11, 1893 (2021).
25. А. И. Лахова и др., Химия и технология топлив и масел 2, 3-6 (2019).
26. E. G. Moiseeva et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 57, 746-752 (2021).

References

1. R. R. Zakieva et al., Chemistry and technology of fuels and oils 57, 5, 740-745 (2021).
2. S. M. Petrov, A. I. Lakhova, Chemistry and technology of fuels and oils 6, 15-20 (2024).
3. E. G. Zaitseva, R. I. Gilyazev, N. V. Kotova, S. M. Petrov, N. Yu. Bashkirtseva, Scientific Journal of the Russian Gas Society, 2, 106-113 (2024).

4. E. G. Zaitseva, A. G. Safiulina, S. M. Petrov, *Egyptian Journal of Petroleum* 33, 2, 315-327 (2024).
5. E. G. Zaitseva et al., *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 60, 3, 551-558 (2024).
6. E. G. Zaitseva, S. M. Petrov, N. Y. Bashkirtseva, *Chemistry and Technology of Fuels and Oil* 1-9 (2024).
7. S. M. Petrov et al., *Petroleum* 10, 2, 216-223 (2024).
8. I. D. Agliullina, M. Yu. Antonova, E. G. Zaitseva, S. M. Petrov, G. P. Kayukova, N. Yu. Bashkirtseva, *Herald of Technological University* 27, 6, 23-29 (2024).
9. E. G. Moiseeva, R. R. Maksumova, S. M. Petrov, A. G. Safiulina, *Chemistry and technology of fuels and oils*. 1, 25-28 (2023).
10. E. G. Moiseeva et al., *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 59, 1, 28-32 (2023).
11. R. R. Zakieva, S. M. Petrov, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 59, 1, 69-74 (2023).
12. S. M. Petrov, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 59, 1, 65-68 (2023).
13. I. D. Agliullina, E. G. Zaitseva, S. M. Petrov, *Herald of Technological University* 26., 8, 52-57 (2023).
14. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 57, 6, 885-890 (2022).
15. S. M. Petrov, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 57, 6, 895-900 (2022).
16. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, N. Y. Bashkirtseva, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 58, 1, 1-5 (2022).
17. E. G. Moiseeva et al., *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 58, 2, 283-288 (2022).
18. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 58, 2, 297-301 (2022).
19. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, N. Y. Bashkirtseva, *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 58, 1, 1-5 (2022).
20. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, *Chemistry and technology of fuels and oils* 2, 27-30 (2022).
21. A. V. Vakhin et al., *Processes* 9, 1, 158 (2021).
22. S. M. Petrov et al., *Processes* 9, 2, 256 (2021).
23. A. I. Lakhova et al., *Processes* 9, 3, 553 (2021).
24. S. M. Petrov et al., *Processes* 9, 11, 1893 (2021).
25. A. I. Lakhova et al., *Chemistry and technology of fuels and oils* 2, 3-6 (2019).
26. E. G. Moiseeva et al., *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 57, 746-752 (2021).

© **М. Ю. Антонова** – студент кафедры Химической технологии переработки нефти и газа (ХТПНГ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, 22b.antonovamu@fnnh.ru; **А. Р. Давлетшин** – д.т.н., доцент, профессор базовой кафедры Технология нефти и газа, Уфимский Государственный Нефтяной Технический Университет, Уфа, Россия, davletshinar@list.ru, **Р. Г. Теляшев** – к.т.н., генеральный директор ООО «Энерджи энд Инжиниринг», Москва, Россия, telrau@mail.ru, **Н. В. Лыжина** – к.э.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ.

© **М. Yu. Antonova** – Student Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (CTOGP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, 22b.antonovamu@fnnh.ru; **A. R. Davletshin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Professor of the Basic Department of Oil and Gas Technology, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia, davletshinar@list.ru, **R. G. Telyashev** – PhD (Technical Sci.), General Director of Energy and Engineering LLC, Moscow, Russia, telrau@mail.ru, **N. V. Lyzhina** – PhD (Economic Sci.), Associate Professor of the CTOGP department, KNRTU.