

DOI: 10.15593/2224-9400/2022.2.03

Научная статья

УДК 662.2.022

М.А. Савастьянова, К.О. Ухин, В.А. Вальцифер

Институт технической химии
Уральского отделения Российской академии наук –
филиал ФГБУН Пермского федерального
исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

СИНТЕЗ КОМБИНИРОВАННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ НА КРЕМНЕЗЕМНОЙ (SiO_2), АЛЮМООКСИДНОЙ (Al_2O_3) И АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$) ОСНОВАХ

Энергетические конденсированные системы в современном мире находят широкое применение. Например, для повышения продуктивности скважин нефтяных месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. За счет сжигания в интервале перфорации скважины заряда газогенератора образуется большой объем пороховых газов. Их высокое избыточное давление способствует значительному приросту количества и размеров остаточных трещин в ближней зоне пласта, что в совокупности с тепловым и физико-химическим воздействием на асфальтосмолистые и парафиновые отложения позволяют повысить выход нефти и газа из скважины. Одной из задач, возникающих при разработке современных газогенерирующих составов, является расширение пределов регулирования их газодинамических характеристик, в частности скорости горения заряда. Перспективным способом решения указанной проблемы является введение в состав катализаторов горения на основе оксидов переходных металлов.

Работа посвящена синтезу образцов комбинированных оксидных катализаторов на кремнеземной (SiO_2), алюмооксидной (Al_2O_3) и алюмосиликатной ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$) основах, модифицированных двумя оксидами переходных металлов (меди, никеля) в соотношении 1:1, с общей массовой долей оксидной фазы до 20 мас. %.

Образцы металлооксидных катализаторов получены двумя методами: 1) методом пропитки основы растворами нитратов меди и никеля с последующей ультразвуковой обработкой, удалением воды и прокаливанием на воздухе при температуре разложения нитратов металлов до соответствующих оксидов; 2) методом прямого гидротермального темплатного синтеза в процессе соконденсации с основами при первоочередном внесении прекурсоров оксидов металлов (нитратов меди и никеля).

Было исследовано влияния особенностей синтеза мезопористых металлооксидных кремнеземов на структуру и текстурные характеристики (удельная поверхность, объем и диаметр пор) полученных образцов.

Ключевые слова: катализаторы, кремнеземная основа, алюмосиликатная основа, алюмооксидная основа, оксиды переходных металлов.

M.A. Savastyanova, K.O. Ukhin, V.A. Valtsifer

Institute of Technical Chemistry
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences –
a Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science
of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

**SYNTHESIS OF COMBINED CATALYSTS
ON SILICA (SiO₂), ALUMINA (Al₂O₃)
AND ALUMINOSILICATE (Al₂O₃–SiO₂) BASES**

Energy condensed systems are widely used in the modern world. For example, to increase the productivity of wells in oil fields with hard-to-recover reserves. Due to the combustion of the charge of the gas generator in the perforation interval of the well, a large volume of powder gases is formed. Their high overpressure contributes to a significant increase in the number and size of residual cracks in the near zone of the formation, which, together with thermal and physico-chemical effects on asphalt and paraffin deposits, can increase the output of oil and gas from the well. One of the tasks that arise in the development of modern gas-generating compositions is to expand the limits of regulation of their gas-dynamic characteristics, in particular, the rate of charge combustion. A promising way to solve this problem is to introduce combustion catalysts based on transition metal oxides into the composition.

The work is devoted to the synthesis of samples of combined oxide catalysts on silica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) and aluminosilicate (Al₂O₃–SiO₂) bases modified with two transition metal oxides (copper, nickel) in a ratio of 1 to 1, with a total mass fraction of the oxide phase up to 20 wt. %.

Samples of metal oxide catalysts were obtained by two methods: 1) by impregnating the base with solutions of copper and nickel nitrates, followed by ultrasonic treatment, removal of water and calcination in air at the decomposition temperature of metal nitrates to the corresponding oxides; 2) by direct hydrothermal template synthesis in the process of co-condensation with the bases with the primary introduction of metal precursors (copper and nickel nitrates).

The influence of the synthesis features of mesoporous metal oxide silica on the structure and textural characteristics (specific surface area, volume and pore diameter) of the obtained samples was investigated.

Keywords: *catalysts, silica base, aluminosilicate base, aluminum oxide base, transition metal oxides.*

Ключевыми параметрами, оказывающими влияние на процесс термогазохимического воздействия, являются скорость и стабильность горения твердотопливного заряда газогенератора, которые в значительной степени определяют интенсивность и характер прироста избыточного давления газообразных продуктов реакции в стволе скважины. В настоящее время большое распространение получили твердотопливные газогенерирующие составы на основе перхлората аммония [1].

Перхлорат аммония является относительно не дорогим и коммерчески доступным окислителем, при разложении которого образуются низкомолекулярные газообразные соединения, что в совокупности обуславливает высокую эффективность его применения для целей термогазохимического воздействия [2, 3].

При разработке современных газогенерирующих составов на основе перхлората аммония основной проблемой является расширение пределов регулирования газодинамических характеристик, которые в свою очередь определяются скоростью горения твердотопливного заряда. Скорость горения и, как следствие, интенсивность газо- и энерговыделения твердотопливного газогенерирующего заряда, напрямую зависят от процесса термоллиза перхлората аммония [4–6].

Одним из способов регулирования параметров горения перхлоратсодержащих твердотопливных составов является использование в качестве функциональных добавок различных катализаторов и модификаторов горения, среди которых наиболее перспективными являются металлооксидные катализаторы [7].

Повышение эффективности действия металлооксидных катализаторов горения возможно благодаря созданию каталитической системы на основе частиц оксидов переходных металлов, высаженных в виде наноразмерного оксидного слоя на поверхность мезопористых носителей (SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) [8, 9]. Это позволит равномерно распределить катализатор в объеме полимерной матрицы и существенно повысить их удельную поверхность. Кроме того, на основании данных о синергетическом эффекте взаимодействия оксидов металлов возможно формирование комбинированного оксидного каталитического слоя на поверхности носителя, состоящего из двух и более оксидов переходных металлов. Варьирование вида и соотношения данных оксидов переходных металлов позволит направленно регулировать параметры процесса разложения перхлората аммония, тем самым создавая более эффективную и универсальную каталитическую систему для регулирования скорости горения и, как следствие, интенсивности газо- и энерговыделения газогенерирующих зарядов для процесса термогазохимического воздействия [10–12].

Благодаря свойствам мезопористых материалов: высокой удельной поверхности, наличию упорядоченной пористой структуры, большому объему пор и распределению их в узком диапазоне, эти материалы нашли применение в катализе [13–15].

Экспериментальная часть. Мезопористые металлооксидные катализаторы были получены двумя методами: методом пропитки (Р) и методом прямого гидротермального синтеза (НТ).

Первый метод включает в себя две стадии:

1) получение основы (кремнеземной – SiO_2 (S), алюмосиликатной – $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ (AS) и алюмооксидной – Al_2O_3 (A));

2) поверхностная модификация основ (A, S, AS) оксидами переходных металлов (меди и никеля).

Получение мезопористых структур S и AS осуществляли с использованием цетилтриметиламмония (СТАВ), который выступает в качестве структурообразующего агента. СТАВ растворяли в щелочной среде при температуре 30–40 °С (перемешивали на магнитной мешалке), затем добавляли тетраэтоксисилан (TEOS) по каплям. При получении алюмосиликатной основы после TEOS добавляли раствор нитрата алюминия ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$). Смесь в обоих случаях постепенно нагревали до 50–80 °С при перемешивании. Образовавшийся гель помещали в автоклав и подвергали гидротермальной обработке при 120 °С в течение 48 ч. Полученный осадок отфильтровывали, промывали до нейтрального pH, сушили при температуре 80 °С. СТАВ удаляли прокаливанием образцов на воздухе при 650 °С в течение 5 ч. Мольные соотношения компонентов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Мольные соотношения компонентов для образцов AS и S

Наименование основы	TEOS	СТАВ	NaOH	H ₂ O	Al(NO ₃) ₃
S	1	0,44	0,4	100	–
AS					0,1

Получение основы А осуществлялось в гидротермальных условиях методом гомогенного осаждения из водно-спиртового раствора смеси хлорида и сульфата алюминия карбидом при pH 7–8. Синтез проводили при температуре 130 °С, время выдержки составляло 65 ч. Осадок промывали до отсутствия сульфат- и хлорид-ионов в промывных водах. Полученный образец высушивали на воздухе и прокаливали при температуре 650 °С в течение 5 ч. Мольные соотношения компонентов представлены в табл. 2.

Дальнейшая поверхностная модификация синтезированных мезопористых носителей проводилась путем смешения растворов нитратов меди ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) и никеля ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) с навесками полученных основ и последующей их обработкой на ультразвуковом гомогенизаторе в

течение 3 мин, удалением растворителя (воды), высушиванием (при 80 °С) и прокаливанием на воздухе при температуре достаточной для разложения нитратов до соответствующих оксидов (450 °С). Таким образом, были получены образцы А–Cu–Ni–P, AS–Cu–Ni–P, S–Cu–Ni–P, содержащие 20 мас. % оксидов меди и никеля в соотношении 1:1.

Таблица 2

Мольные соотношения компонентов для образца А

$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Изопропиловый спирт	H_2O	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$
0,5	0,025	5	85	2

Второй метод приготовления катализаторов производился методом прямого гидротермального темплатного синтеза в процессе соконденсации при первоочередном внесении прекурсоров металла в реакционную среду, в качестве которых использовались нитраты меди и никеля. Синтез осуществляли в щелочной среде (NaOH) с использованием структурообразующего компонента – СТАВ. Источниками оксидов кремния и алюминия являлись те же компоненты, что и при приготовлении основ А, AS, S. Таким образом были приготовлены образцы А–Cu–Ni–HT, AS–Cu–Ni–HT, S–Cu–Ni–HT, содержащие 20 мас. % оксидов никеля и меди. Мольные соотношения компонентов представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Мольные соотношения для образцов S–Cu–Ni–HT, AS–Cu–Ni–HT

Наименование основы	TEOS	СТАВ	NaOH	H_2O	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
S–Cu–Ni–HT	1	0,44	0,4	100	–	0,015	0,0125
AS–Cu–Ni–HT					0,1		

Таблица 4

Мольные соотношения для образца А–Cu–Ni–HT

$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Изопропиловый спирт	H_2O	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
0,5	0,025	5	85	2	0,0125	0,0130

Далее с помощью метода РФА на дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu, Япония) при использовании CuK_α -излучения ($\lambda_{\text{ср}} = 1,54184 \text{ \AA}$), угловой интервал $2\theta = 10 \dots 80^\circ$, шаг $0,01\text{--}0,005^\circ$, время накопления сигнала 1,5–2 с, был изучен фазовый состав активной оксидной составляющей синтезированных образцов комбинированных оксидных катализаторов.

Согласно полученным данным синтезированные основы S, AS, А являются аморфными. На представленных дифрактограммах (рис. 1)

аморфные оксид кремния и оксид алюминия можно выделить в виде возмущений, не имеющих острых пиков. На рисунке основы представлены кривыми черного цвета.

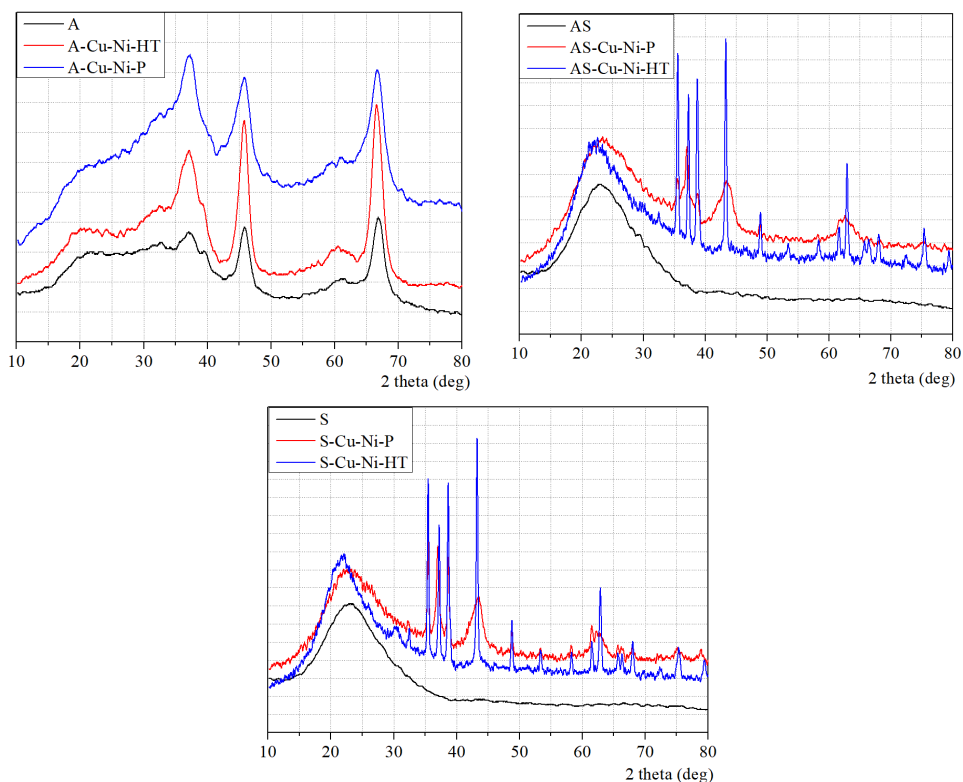


Рис. 1. Диффрактограммы синтезированных основ и катализаторов

В образцах AS–Cu–Ni–P, S–Cu–Ni–P, AS–Cu–Ni–HT, S–Cu–Ni–HT острые пики соответствуют оксидам введенных оксидов металлов. Конфигурация оксида никеля $Fm-3m$ (бунзенит), конфигурация оксида меди $C2/c$ (тенорит). В образцах A–Cu–Ni–P, A–Cu–Ni–HT присутствие оксидов меди и никеля не определено.

Текстурные характеристики основ и образцов катализаторов, содержащих оксиды меди и никеля, определены методом низкотемпературной сорбции газообразного азота на приборе ASAP 2020 (Micromeritics) после дегазации материала в вакууме при температуре 350 °С в течение 3 ч. Удельная поверхность ($S_{\text{ВЕТ}}$) и общий объем пор ($V_{\text{пор}}$) образцов рассчитаны по методу ВЕТ. Распределение пор по размерам определены по изотермам десорбции методом ВЖН в интервале размеров пор 1,7–300 нм.

Основы S, AS имеют высокую удельную поверхность – 1227 и 1076 м²/г соответственно. Основа А имеет значительно меньшую удель-

ную поверхность – $207,1 \text{ м}^2/\text{г}$. Для синтезированных основ наблюдается мезопористая структура, что видно по характеру изотерм сорбции и распределения пор по размерам, представленных на рис. 2.

Установлено, что в результате поверхностной модификации основные текстурные характеристики синтезированных материалов – удельная поверхность и общий объем пор в образцах AS–Cu–Ni–P, S–Cu–Ni–P уменьшились на $\approx 25\text{--}30\%$ по сравнению с соответствующими основами. В случае с образцом A–Cu–Ni–P наблюдается небольшое увеличение значения удельной поверхности с $207,1$ до $212,8 \text{ м}^2/\text{г}$.

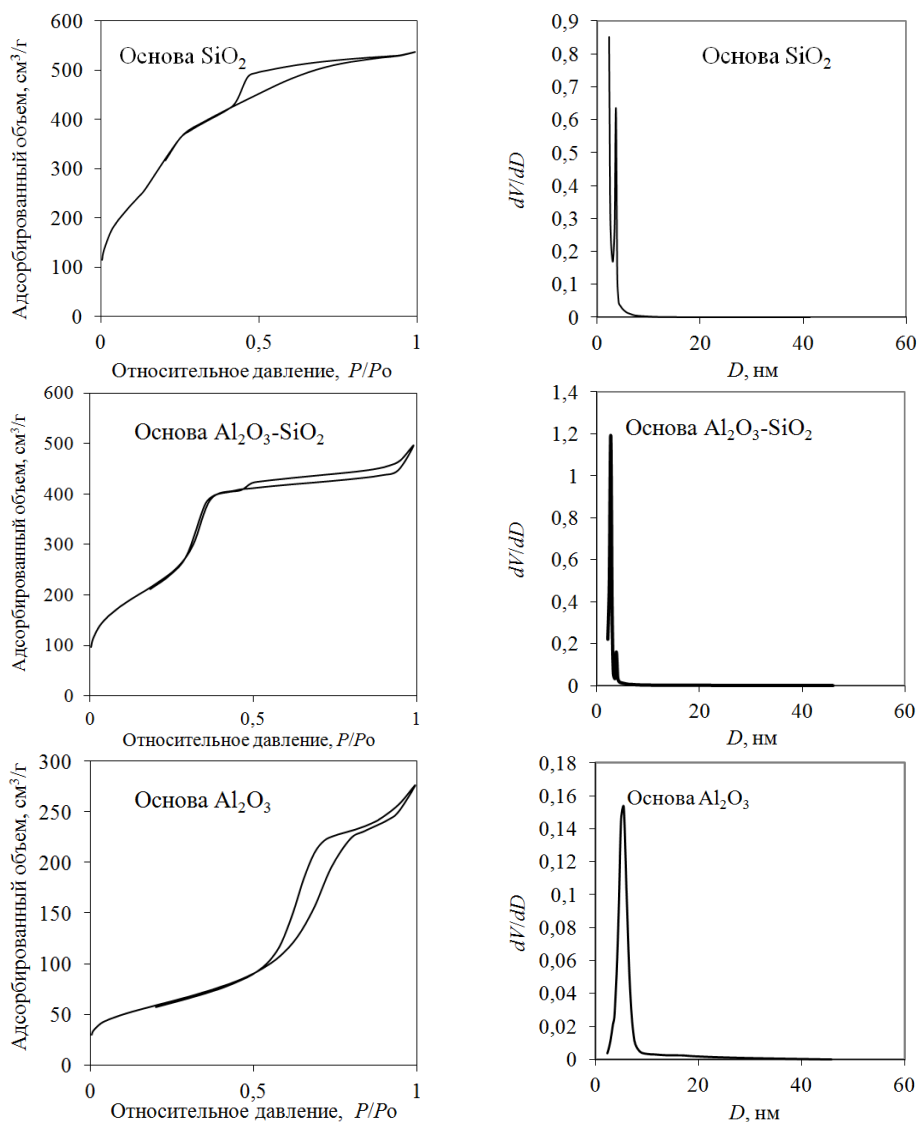


Рис. 2. Изотермы сорбции (слева) и распределение пор (справа) для основ S, AS, A

Образцы, полученные методом прямого гидротермального синтеза А–Cu–Ni–HT, AS–Cu–Ni–HT, S–Cu–Ni–HT, имеют низкие значения удельной поверхности и большие значения размера пор в сравнении с аналогичными значениями основ А, AS, S. Данные текстурных характеристик представлены в табл. 5.

Таблица 5

Текстурные характеристики образцов

Наименование образца	Уд. поверх., $S_{\text{ВЕТ}}$, м ² /г	Объем пор, $V_{\text{пор}}$, см ³ /г	Размер пор, D , нм
Основа Al ₂ O ₃ (А)	207,1	0,43	5,9
Основа SiO ₂ (S)	1227	0,74	3,1
Основа Al ₂ O ₃ -SiO ₂ (AS)	1076	0,85	3,1
А–Cu–Ni–P	212,8	0,35	4,7
S–Cu–Ni–P	877,8	0,52	3,4
AS–Cu–Ni–P	743	0,64	3,6
А–Cu–Ni–HT	144,9	0,43	10,4
S–Cu–Ni–HT	58,59	0,18	12,8
AS–Cu–Ni–HT	151,1	0,56	12,9

Сравнивая текстурные характеристики образцов, полученных двумя методами, можно сделать вывод о том, что метод пропитки является более эффективным, так как позволяет синтезировать образцы катализаторов с более высоким значением удельной поверхности.

Таким образом, разработаны методы синтеза комбинированных катализаторов на кремнеземной, алюмооксидной и алюмосиликатной основах. Образцы катализаторов синтезированы двумя методами: методом пропитки и методом прямого гидротермального синтеза. Методом рентгенофазового анализа изучен фазовый состав активной оксидной компоненты синтезированных образцов. Установлено наличие оксидов меди и никеля в составе синтезированных образцов AS–Cu–Ni–P, S–Cu–Ni–P, AS–Cu–Ni–HT, S–Cu–Ni–HT. По результатам сравнения текстурных характеристик образцов катализаторов синтезированных методом пропитки и методом прямого гидротермального синтеза можно сделать вывод о том, что метод пропитки является более эффективным, так как образцы, полученные данным методом, обладают более высоким значением удельной поверхности.

Список литературы

1. Кравченко О.В., Велигоцкий Д.А., Хабибуллин Р.А. Перспективные технологии комплексного воздействия на пласт для разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа // Труды Российской технической нефтегазовой конференции и выставки SPE по разведке и добыче. – М., 2014. – С. 1–8.

2. Легостаева А.В., Кольцова Э.М. Моделирование фильтрации при высокотемпературном воздействии парогазовой смеси в пласт // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2016. – Т. 30. – С. 53–55.

3. Математическое моделирование воздействия на призабойную зону высокотемпературной парогазовой смесью при горении твердотопливного заряда в условиях нефтяной скважины / М.А. Федосеев, М.Б. Глебов, Э.М. Кольцова, Л.С. Гордеев // *Теоретические основы химической технологии*. – 2010. – Т. 44, № 4. – С. 417–424.

4. Recent Research Progress in Burning Rate Catalysts / J. Gao, L. Wang, H. Yu, A. Xiao, W. Ding // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2011. – Vol. 36. – P. 404–409.

5. Ballistic modification of nitramine propellants with special reference to NG-PE-PCP-based high energy propellants / S.M. Pande, V.S. Sadavarte, D. Bhowmik, D.D. Gaikwad, H. Singh // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2012. – Vol. 37. – P. 707–712.

6. Boldyrev V.V. Thermal decomposition of ammonium perchlorate // *Thermochimica Acta*. – 2006. – Vol. 443. – P. 1–36.

7. Влияние дисперсности добавок металлов на скорость горения смесевых композиций / В.А. Архипов, А.Г. Коротких, В.Т. Кузнецов, Л.А. Савельева // *Химическая физика*. – 2004. – Т. 23, № 9. – С. 18–21.

8. Горбачев В.А., Убей-Волк Е.Ю., Агульчанский К.А. Возможные пути повышения энергомассовых характеристик СТРТ // *Известия РАРАН*. – 2014. – № 2. – С. 37–42.

9. Synthesis and characterization of MCM-41 supported nickel oxide catalysts / D.J. Lensveld, J.G. Mesu, A.J. Dillen, K.P. De // *Microporous Mesoporous Mater.* – 2001. – Vol. 44–45. – P. 401.

10. Studies on the effect of concentration of ferric oxide catalyst in the thermal decomposition of ammonium perchlorate / R. Rajeev, C. Gopalkrishnan, K. Krishnan, K. Kannan, K. Ninan // *3rd International High Energy Materials Conference and Exhibition (HEMCE)*. – Kerala, India, 2000. – С. 121–125.

11. Hait S., Krishnamurthy V., Joshi S. Characterization of nano iron oxide and its effect on thermal decomposition of ammonium perchlorate // *5th International High Energy Materials Conference and Exhibition (HEMCE)*. – Hyderabad, India, 2005. – P. 111–115.

12. Preparation of Cu/CNT Composite Particles and Catalytic Performance on Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate / C. Ping, F. Li, Z. Jian, J. Wei // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2006. – Vol. 31, no. 6. – P. 452–455.

13. In situ deposition of NiO nano particles on cotton fabric using sol-gel method- photocatalytic activation properties / S. Pooyandeh, S. Shahidi, A. Khajeh-nezhad, R. Mongkholrattanasit // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 12. – P. 1–14.

14. Improved activity of Ni–Mo/SiO₂ bimetallic catalyst synthesized via sol-gel method for methylcyclohexane cracking / J. Zhang, T. Chen, Y. Jiao,

M. Cheng, L.-L. Wang, J.-L. Wang, Y.-Q. Chen // *Petroleum Science*. – 2021. – Vol. 18. – P. 1530–1542.

15. Preparation and Characterization of Ni Nanoparticles in an MCM Mesoporous Material / J. Jung, W. Chael, R.A. McIntyre, C.T. Seip, J.B. Wiley, C.J. Connor // *Mater. Res. Bull.* – 1999. – Vol. 34. – P. 1353.

References

1. Kravchenko O. V., Veligotsky D.A., Khabibullin R. A. Perspektivnye tekhnologii kompleksnogo vozdejstviya na plast dlya razrabotki trudnoizvlekaemykh zapasov nefti i gaza. [Promising technologies of complex impact on the reservoir for the development of hard-to-recover oil and gas reserves]. *Trudy Rossijskoj tekhnicheskoy neftegazovoj konferencii i vystavki SPE po razvedke i doboyche*, 14-16 October, Moscow, 2014, pp. 1-8.

2. Legostaeva A.V., Koltsova E.M. Modelirovanie fil'tracii pri vysokotemperaturnom vozdejstvii parogazovoj smesi v plast [Modeling of filtration under high-temperature exposure of a vapor-gas mixture in the formation]. *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii*, 2016, Vol.30, pp.53-55.

3. Fedoseev M.A. Matematicheskoe modelirovanie vozdejstviya na prizabojnuyu zonu vysokotemperaturnoj parogazovoj smes'yu pri gorenii tverdotoplivnogo zaryada v usloviyah neftyanoy skvazhiny [Mathematical modeling of the impact on the bottom-hole zone by a high-temperature vapor-gas mixture during the combustion of a solid fuel charge in an oil well]. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*, 2010, Vol. 44, No. 4, pp. 417-424.

4. Gao J., Wang L., Yu H., Xiao A., Ding W. Recent Research Progress in Burning Rate Catalysts. *J. Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2011, V. 36, pp. 404 – 409.

5. Pande S.M., Sadavarte V.S., Bhowmik D., Gaikwad D.D., Singh H. Ballistic modification of nitramine propellants with special reference to NG-PE-PCP-based high energy propellants. *J. Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, V. 37, pp. 707-712.

6. Boldyrev V.V. Thermal decomposition of ammonium Perchlorate. *J. Thermochimica Acta*, 2006, Vol. 443, pp. 1-36.

7. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G., Kuznetsov V.T., Savelyeva L.A. Vliyanie dispersnosti dobavok metallov na skorost' goreniya smesevykh kompozicij [The influence of the dispersion of metal additives on the combustion rate of mixed compositions] *Himicheskaya fizika. Gorenje*, 2004, Vol. 23, No. 9, pp. 18-21.

8. Gorbachev V.A., Ubej-Wolf E.Yu., Ogulchansky K.A. Vozmozhnye puti povysheniya energomassovykh harakteristik STRT [Possible ways to increase the energy-mass characteristics of STT]. *Izvestia RARAN*, 2014, No. 2, pp. 37-42.

9. Lensveld D.J., Mesu J.G., Dillen A. J., De K.P. Synthesis and characterization of MCM-41 supported nickel oxide catalysts. *Microporous Mesoporous Mater*, 2001, Vol.44-45, pp. 401.

10. Rajeev R., Gopalkrishnan C., Krishnan K., Kannan K., Ninan K. Studies on the effect of concentration of ferric oxide catalyst in the thermal decomposition of ammonium Perchlorate. *3rd International High Energy Materials Conference and Exhibition (HEMCE)*, Kerala, India, 2000, pp. 121-125.

11. Hait S., Krishnamurthy V., Joshi S. Characterization of nano iron oxide and its effect on thermal decomposition of ammonium Perchlorate. *5th International High Energy Materials Conference and Exhibition (HEMCE)*, Hydrabad, India, 2005, pp. 111-115.

12. Ping C., Li F., Jian Z., Wei J. Preparation of Cu/CNT Composite Particles and Catalytic Performance on Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate. *J. Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, Vol. 31, No. 6, pp. 452-455.

13. Pooyandeh S., Shahidi S., Khajehnezhad A., Mongkholrattanasit R. In situ deposition of NiO nano particles on cotton fabric using sol-gel method-photocatalytic activation properties. *J. of Materials Research and Technology*, 2021, Vol. 12, pp. 1-14.

14. Zhang J., Chen T., Jiao Y., Cheng M., Wang L.-L., Wang J.-L., Chen Y.-Q. Improved activity of Ni-Mo/SiO₂ bimetallic catalyst synthesized via sol-gel method for methylcyclohexane cracking. *J. Petroleum Science*, 2021, Vol. 18, pp. 1530-1542.

15. Jung J., Chael W., McIntyre R.A., Seip C.T., Wiley J.B., Connor C.J. Preparation and Characterization of Ni Nanoparticles in an MCM Mesoporous Material. *Mater. Res. Bull.*, 1999, Vol. 34, pp. 1353.

Об авторах

Савастьянова Мария Анатольевна (Пермь, Россия) – инженер, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: mariysav75@gmail.com).

Ухин Константин Олегович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: Ukhin_k@mail.ru).

Вальцифер Виктор Александрович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра УрО Российской академии наук (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3, e-mail: valtsiferv@mail.ru).

About the authors

Maria A. Savastyanova (Perm, Russian Federation) – Engineer, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614013, Perm, Akademik Korolev str., 3, e-mail: mariysav75@gmail.com).

Konstantin O. Ukhin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614013, Perm, Akademik Korolev str., 3, e-mail:Ukhin_k@mail.ru).

Victor A. Valtsifer (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, professor, Institute of Technical Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614013, Perm, Akademik Korolev str., 3, e-mail: valtsiferv@mail.ru).

Поступила: 28.04.2022

Одобрена: 16.05.2022

Принята к публикации: 26.05.2022

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-43-596007. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Савастьянова, М.А. Синтез комбинированных катализаторов на кремнеземной (SiO_2), алюмооксидной (Al_2O_3) и алюмосиликатной ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) основах / М.А. Савастьянова, К.О. Ухин, В.А. Вальцифер // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2022. – № 2. – С. 43–54.

Please cite this article in English as:

Savastyanova M.A., Ukhin K.O., Valtsifer. V.A. Synthesis of combined catalysts on silica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) and aluminosilicate ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) bases. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2022, no. 2, pp. 43-54 (In Russ).