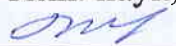


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ХИМИИ
Кафедра органической и экологической химии

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Заведующий кафедрой
канд. техн. наук, доцент
 Г. Н. Шигабаева
20.06.2023 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
магистерская диссертация

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ПРОЦЕССА
КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПИРОЛИЗА ПОЛИЭТИЛЕНА**

04.04.01 Химия

Магистерская программа «Химия нефти и экологическая безопасность»

Выполнила работу
студентка 2 курса
очной формы обучения
Научный руководитель
К.х.н., доцент кафедры
органической и
экологической химии




Тиссен Екатерина
Артуровна

Консультант
К.х.н., лаборант-исследователь,
Лаборатория теории и оптимизации
химических и технологических процессов



Метелёва Галина
Петровна

Рецензент
К.х.н., младший научный сотрудник,
Центр природовдохновенного
инжиниринга



Харитонцев Владимир
Борисович



Кадыров Тагир
Равилевич

Тюмень
2023

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
I. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	6
1. Основные способы переработки пластика	6
2. Каталитический пиролиз пластиковых отходов.....	10
3. Виды катализаторов, применяемых в процессе каталитического пиролиза пластиков .	12
4. Каталитическая деструкция С-С-связанных полимеров.....	13
5. Общие механизмы реакции крекинга	16
6. Преимущества и недостатки различных видов катализаторов в процессе каталитического пиролиза пластика	18
7. Столбчатые глины (PILC)	20
8. Влияние кислотных и структурных свойств на эффективность глинистых катализаторов.....	24
II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	27
1. Объекты и методы исследования	27
2. Методика перекристаллизации полиэтилена высокой плотности	27
3. Приготовление суспензии для синтеза столбчатой глины.....	28
4. Методика синтеза МСМ-41	29
5. Изучение кислотных свойств катализаторов	30
6. Изучение структурных свойств катализаторов	30
7. Изучение процесса каталитического пиролиза полиэтилена методом термогравиметрии	31
8. Изучение процесса каталитического пиролиза полиэтилена методом пиролитической газовой хроматографии	31
III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ	33
1. Кислотные свойства катализаторов	33
2. Структурные свойства катализаторов	35
3. Температурная характеристика процесса деструкции полиэтилена в присутствии катализаторов.....	37
4. Анализ продуктов каталитического пиролиза ПЭВП методом Пиро-ГХ/МС	43
ВЫВОД	58
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	59

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Загрязнение пластмассами окружающей среды стало серьезной проблемой в последние годы, производство пластика составляет более 300 миллионов тонн в год [1]. Одной из проблем является проблема микропластика, связанная с неразлагаемыми свойствами пластикового полимера. Сообщалось о многочисленных усилиях по сокращению и преодолению присутствия пластмасс и микропластиковых отходов, и одной из многообещающих альтернатив является преобразование пластиковых отходов в возобновляемую энергию [2]. Поскольку углеводород является основой пластмасс, каталитические процессы пластической структуры в рамках процесса пиролиза способны производить водород и жидкое топливо. Механизмы преобразования включают крекинг, гидрокрекинг и гидрогенизацию, которые могут восстановить энергию, содержащуюся в пластике [3]. Для этих механизмов катализаторы играют важную роль в определении эффективности и результативности процесса конверсии. Хотя с точки зрения кинетики и термодинамики роль катализатора заключается в ускорении реакции, фактически он определяет преобладающий продукт реакции, который в дальнейшем называют селективностью, оптимальные условия реакции, а также энергию, необходимую для процесса [4]. Пиролиз может осуществляться термическим или каталитическим способами. Однако по сравнению с методом термического разложения каталитический метод имеет некоторые преимущества, например, возможность проводить процесс при более низкой температуре и уменьшить твердые остатки, такие как карбонизированный уголь и летучие фракции, также короткое время процесса, высокую селективность по продукту, высокое октановое число и т. д. [5].

Катализаторы на основе цеолита являются наиболее популярными как для пиролиза, так и для совместного пиролиза комбинированных пластиковых

отходов/биомассы. Интенсивный каталитический механизм обеспечивается миграцией реагентов и поверхностной реакцией по микропористой структуре цеолита [6]. Несмотря на то, что аналогичный механизм также имеет место на глине, катализатору на основе глины уделяется меньше внимания [7]. Учитывая множество возможных модификаций, глинистые катализаторы являются хорошими кандидатами в качестве недорогих катализаторов для пиролиза пластиковых отходов. Во многих модификациях цеолита и глиняного каркаса с металлами или цеолитами из оксидов металлов предпринимались попытки повысить каталитическую активность за счет увеличения эффективности путей реакции, таких как гидрирование, гидродеоксигенация, крекинг и т. д. Термическая и химическая стабильность катализаторов относится к использованию высокотемпературных условий и очень сложных реакций, участвующих в механизмах, в качестве важных характеристик, помимо твердой кислотности и способности обеспечивать эффективный массоперенос на каталитических стадиях. Что касается их обильных источников в природе, то и глинистые, и цеолитовые материалы встречаются как дешевые минералы.

Цель. Изучить влияние катализатора и параметров эксперимента на состав продуктов каталитического пиролиза полиэтилена.

Задачи:

- определить температуру полной деструкции полиэтилена в присутствии различных катализаторов;
- изучить кислотные свойства цеолитов и глинистых катализаторов;
- выявить зависимости выхода продуктов пиролиза от кислотных и структурных свойств катализатора.

Апробация работы и публикации. Результаты, приведенные в данной диссертационной работе, легли в основу научной статьи, опубликованной в журнале «Катализ в промышленности» (Q4), входящий в базу данных Scopus.

Помимо этого, результаты исследования были представлены на следующих конференциях: 73 научная студенческая конференция ТюмГУ, «Химия и химическая технология».

В ходе подготовки выпускной квалификационной работы использовались приемы критического анализа проблемных ситуаций на основе системного подхода, с возможностью выработки стратегии действий, а также методы саморазвития и самореализации (в том числе здоровьесбережение) с возможностью реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.

Формулирование выводов и разработка рекомендаций по результатам проведенного исследования осуществлялись с учетом способности управлять проектом на всех этапах жизненного цикла, способности организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.

Данные, представленные в работе, получены при финансовой поддержке Тюменской области в рамках грантового соглашения в виде субсидии для некоммерческих организаций (№ 89-ДОН от 12.07.2020) и частично выполнены на приборной базе ЦКП «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» Тюменского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miandad R., Barakat M.A., Rehan M., Aburiazaiza A.S. Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts // *Waste Manag.* 2017. V. 69. P. 66–78.
2. Rehan M., Nizami A.S., Asam Z.U.Z., Ouda O.K.M. Waste to Energy: A Case Study of Madinah City // *Energy Procedia.* 2017. V. 142. P. 688–693.
3. Zakir H.M., Hossain H. Q., Uddin M.M., Ahmed M.T. Municipal solid waste (MSW) as a source of renewable energy in Bangladesh: Revisited // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014. P. 39. P. 35–41.
4. Kunwar B., Cheng H.N., Chandrashekar S.R., Sharma B.K. Plastics to fuel: A review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. V. 54. P.421–428.
5. Al-Salem S.M., Antelava A., Constantinou A., Manos G., Dutta A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW) // *J. Environ. Manag.* 2017. V. 197. P. 177–198.
6. Olaremu A.G., Adedoyin W.R., Ore O.T., Adeola A.O. Sustainable development and enhancement of cracking processes using metallic composites // *Appl. Petrochem. Res.* 2021. V. 11. P. 1–18.
7. Budsareechai S., Hunt A.J., Ngernyen Y. Catalytic pyrolysis of plastic waste for the production of liquid fuels for engines // *RSC Adv.* 2019. V. 9. P. 5844–5857.
8. Ragaert K., Delva L., Van Geem K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste // *Waste Manage.* 2017. V. 69. P. 24–58.
9. Ravve A., *Principles of Polymer Chemistry*, Kluwer Academic/Plenum Publishers. 2000.
10. Borrelle S. B., Ringma J., Law K. L., Monnahan C. C. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution // *Science.* 2020. V. 369. P. 1515–1518.
11. Panda A. K., Singh R. K., Mishra D. K. Thermolysis of Waste Plastics to Liquid Fuel: A Suitable Method for Plastic Waste Management and

- Manufacture of Value Added Products—A World Prospective. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2010. V. 14. P. 233–248.
12. Aguado J., Serrano D. P., Escola J. M. Fuels from Waste Plastics by Thermal and Catalytic Processes: A Review // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008. V.47.P. 7982–7992.
 13. Yang V, Sun L., Xiang J., Hu S. On the role of flame retardants in mechanical recycling of solid plastic waste // *Waste Manage.* 2013. V.33. P. 462–473.
 14. Hafeez S., Pallari E., Manos G. Catalytic Conversion and Chemical Recovery // *Plastics to Energy.* 2018. P. 147-172.
 15. Maharana T., Negi Y. S., Mohanty B. Polym.-Plast. Pyrolysis of Polystyrene Waste: A Review // *Technol. Eng.* 2007. V. 46. P. 729–736.
 16. Banu J. R, Sharmila V. G., Ushani U., Amudha V. Impervious and influence in the liquid fuel production from municipal plastic waste through thermo-chemical biomass conversion technologies - A review // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 718. P. 2-13.
 17. Mohanraj C., Senthilkumar T., Chandrasekar M. Experimental Study on the Performance of an SI Engine Fueled by Waste Plastic Pyrolysis Oil–Gasoline Blends // *Int. J. Energy Res.* 2017. V. 41. P. 1534–1552.
 18. Miskolczi N., Angyal A., Bartha L., Valkai I. Fuel by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor // *Fuel Processing Technology.* 2009. V. 90. P. 1032 – 1040.
 19. Yan G., Jing X., Wen H., Xiang S. Thermal cracking of virgin and waste plastics of PP and LDPE in a semi-batch reactor under atmospheric pressure. *Energy Fuels.* 2015. V. 2. P. 2289 -2298.
 20. Jacyra G.F., de Melo C.F., de Souza S.P.L., Marques M.R.C. Production of light hydrocarbons from pyrolysis of heavy gas oil and high density polyethylene using pillared clays as catalysts // *Anal. Appl. Pyrolysis.* 2017. V. 126. P. 70 – 76.
 21. Kaminsky W., Zorriquetta N. Catalytical and thermal pyrolysis of polyolefins. // *Anal. Appl. Pyrolysis.* 2007. V.79. P. 368 - 374.

22. Ivanova S.R., Gumerova E.F., Minsker K.S., Zaikov G.E., Berlin A.A. Selective catalytic degradation of polyolefins. // *Prog. Polym. Sci.* 1990. V.15. P. 193 – 215.
23. Achilias D.S., Roupakia C., Megalokonomos P., Lappas A.A., Antonakou E.V. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP) // *Journal of Hazardous Materials.* 2007. V. 149. P. 536 – 542.
24. Syamsiro M., Saptoadi H., Norsujianto T., Cheng S., Alimuddin Z., Fuel oil production from Municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors // *Energy Process.* 2014. V. 47. P. 180 – 188.
25. Sriningsih W., Saerodji M.G., Trisunaryanti W., Fuel production from LDPE plastic waste over natural zeolite supported Ni, Ni-Mo, Co and Co-Mo metals. *Procedia Environmental Science.* 2014. V. 20. P. 215 – 224.
26. Anuar S. D., Abnisa F., Daud W. Aroua, M. K. A review on pyrolysis of plastic wastes // *Energy Convers. Manag.* 2016. V. 115. P. 308–326.
27. Wong S. L., Ngadi N., Abdullah T. A., Inuwa, I. M. Current state and future prospects of plastic waste as source of fuel: a review // *Renew. Sust.* 2018. V.1. P. 5-14.
28. Lopez G., Artetxe M., Amutio M., Bilbao J., Olazar M. Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. A review // *Renew. Sust. Energy Rev.* 2017. V. 73. P. 346–368.
29. Kunwar B., Cheng H. N., Chandrashekar S. R. Sharma B. K. Plastics as fuel: a review. // *Renew. Sust. Energy Rev.* 2016. V. 54. P. 421–428.
30. Serrano D. P., Aguado J., Escola, J. M. Developing advanced catalysts for the conversion of polyolefinic waste plastics into fuels and chemicals // *ACS Catal.* 2012. V. 2. P. 1924–1941.
31. Schenk N. J., Biesbroek A., Heeres A., Heeres, H. J. Process for the preparation of aromatic compounds // US patent US20170247617A1. 2017.
32. Ding W., Liang J., Anderson L. L. Hydrocracking and hydroisomerization of high-density polyethylene and waste plastic over zeolite and silica–alumina-

- supported Ni and Ni–Mo sulfides. // *Energy Fuels*. 1997. V. 11. P. 1219–1224.
34. Escola J. M. Catalytic hydroreforming of the polyethylene thermal cracking oil over Ni supported hierarchical zeolites and mesostructured aluminosilicates // *Appl. Catal.* 2011. V. 106. P. 405–415.
35. Sriningsih W. Fuel production from LDPE plastic waste over natural zeolite supported Ni, Ni–Mo, Co and Co–Mo metals // *Procedia Environ. Sci.* 2014. V. 20. P. 215–224.
36. Jumah A., Anbumuthu V., Tedstone A. A., Garforth A. A. Catalyzing the hydrocracking of low density polyethylene // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2019. V. 58. P. 20601–20609.
37. Akah A., Hernandez-Martinez J., Rallan C., Garforth A. A. Enhanced feedstock recycling of post-consumer plastic waste // *Chem. Eng. Trans.* 2015. V. 43. P. 2395–2400.
38. Hibbitts D. D., Flaherty D. W., Iglesia E. Role of branching on the rate and mechanism of C–C cleavage in alkanes on metal surfaces // *ACS Catal.* 2016. V. 6. P. 469–482.
39. Rorrer J. E., Beckham G. T., Román-Leshkov Y. Conversion of polyolefin waste to liquid alkanes with Ru-based catalysts under mild conditions // *JACS Au*. 2020. V. 1. P. 8–12.
40. Coates G. W., Hustad P. D., Reinartz S. Catalysts for the living insertion polymerization of alkenes: access to new polyolefin architectures using Ziegler–Natta chemistry // *Angew. Chem. Int.* 2002. Ed. 41. P. 2236–2257.
41. Westhues S., Idel J., Klankermayer J. Molecular catalyst systems as key enablers for tailored polyesters and polycarbonate recycling concepts // *Sci. Adv.* 2018. V. 4. P. 1–8.
42. Jia X., Qin C., Friedberger T., Guan Z., Huang Z. Efficient and selective degradation of polyethylenes into liquid fuels and waxes under mild conditions // *Sci. Adv.* 2016. V. 2. P. 1–7

43. Ellis L. D. Tandem heterogeneous catalysis for polyethylene depolymerization via an olefin-intermediate process // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2021. V. 9. P. 623–628.
44. Zhang F. Polyethylene upcycling to long-chain alkylaromatics by tandem hydrogenolysis/aromatization // *Science*. 2020. V. 370. P. 437–441.
45. Smith R. F., Boothroyd S. C., Tompson R. L., Khosravi, E. A facile route for rubber breakdown via cross metathesis reactions // *Green Chem.* 2016. V. 18. P. 3448–3455.
46. Bidange J., Fischmeister C., Bruneau C. Ethenolysis: a green catalytic tool to cleave carbon–carbon double bonds // *Chem. Eur. J.* 2016. V. 22. P. 12226–12244.
47. Tomás R. A. F., Bordado J. C. M., Gomes J. F. P. p-Xylene oxidation to terephthalic acid: a literature review oriented toward process optimization and development // *Chem. Rev.* 2013. V. 113. P. 7421–7469.
48. Pifer A., Sen A. Chemical recycling of plastics to useful organic compounds by oxidative degradation // *Angew. Chem. Int. Ed.* 1998. V. 37. P. 3306–3308.
49. Bockhorn H., Hornung A., Hornung U. // *Anal. Appl. Pyrolysis*. 1999. V. 50. P. 77–101.
50. Valanciene E., Miknius L., Pedisius N. // *Therm. Anal. Calorim.* 2016. V. 124. P. 341–354.
51. Ding K., Liu S., Huang Y., Liu S. A Review on Role of Process Parameters on Pyrolysis of Biomass and Plastics: Present Scope and Future Opportunities in Conventional and Microwave-Assisted Pyrolysis Technologies // *Energy Convers. Manag.* 2019. V. 196. P. 1316–1325.
52. Seung-Kyu Kima, Ji-Su Kim, Hwan Lee, Hee-Jee Lee. Abundance and characteristics of microplastics in soils with different agricultural practices: Importance of sources with internal origin and environmental fate // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. V. 403. P. 24–37.

53. Chika Muhammad, Jude A. Onwudili, Paul T. Williams. Catalytic pyrolysis of waste plastic from electrical and electronic equipment // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2015. V. 113. P. 332-339.
54. Soufizadeh M., Doniavi A., Hasanzadeh R. Assessment and optimization of plastic waste pyrolysis using quality control techniques based on kinetic modeling // *Int. J. Environ. Sci. Techno.* 2021. V.19. P. 3897-3906.
55. Yin D., Jun Z., Jia-Wei L. A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization // *Journal of Cleaner Production*. 2021. V.293. P.2-17.
56. Miandad R., Barakata M.A., Rehan M.. Plastic waste to liquid oil through Catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts // *Waste Management*. 2017. V.69. P. 66-78.
57. Kaixin Li, Yiqian Wang, Wenjie Zhou. Catalytic pyrolysis of film waste over Co/Ni pillared montmorillonites // *Chemosphere*. 2022. V. 299. P.7-15.
58. Qiuhao W., Yunpu W., Lin J Microwave-assisted catalytic upgrading of copyrolysis vapor using HZSM-5 and MCM-41 for bio-oil production: Co-feeding of soapstock and straw in a downdraft reactor // *Bioresource Technology*. 2020. V. 299. P.3-17.
59. Dingding Y., Haiping Y., Hanping C. Paul T. Williams. Co-precipitation, impregnation and so-gel preparation of Ni catalysts for pyrolysis-catalytic steam reforming of waste plastics // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018. V. 239. P. 565-577.
60. Pengcheng L., Honghai W., Changjin L. New design for titanium-pillared montmorillonite composites as efficient heterogeneous catalysts to enhance Fe(II) reductivity for 2-nitrophenol removal // *Applied Clay Science*. 2021. V.205. P.127-139.
61. Molina C.B., Pizarro A.H., Casas J.A., Rodriguez J.J.. Aqueous-phase hydrodechlorination of chlorophenols with pillared clays-supported Pt, Pd

- and Rh catalysts // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2014. V.148-149. P. 330-338.
63. Yang H., Aming X., Farzad S. Core-shell heterostructured nanofibers consisting of Fe₇S₈ nanoparticles embedded into S-doped carbon nanoshells for superior electromagnetic wave absorption // *Chemical Engineering Journal*. 2021. V. 423. P.1-10.
64. Baloyi J., Ntho T., Moma, J. Synthesis and application of pillared clay heterogeneous catalysts for wastewater treatment: a review // *RSC Adv*. 2018. V. 8. P. 5197–5211.
65. Nawani P., Gelfer M.Y., Hsiao B.S. Surface modification of nanoclays by catalytically active transition metal ions // *Langmuir*. 2007. V. 23. P. 9808–9815.
66. Zuo S., Ding M., Tong J. Study on the preparation and characterization of a titanium-pillared clay-supported CrCe catalyst and its application to the degradation of a low concentration of chlorobenzene // *Appl. Clay Sci*. 2015. V. 105–106. P. 118–123.
67. Skaribas S.P., Pomonis P.J., Grange P. Controlled architecture of solids with micro- and meso-porosity obtained by pillaring of montmorillonite with LaNiO binary oxide // *J. Chem. Soc. Faraday. Trans*. 1992. V. 88. P. 3217–3223.
68. Ahmad I., Khan M., Khan H. Influence of Metal-Oxide-Supported Bentonites on the Pyrolysis Behavior of Polypropylene and High-Density Polyethylene // *J. Appl. Polym. Sci*. 2014. V. 132. P. 1–19.
69. Patil V., Adhikari S., Cross P. Co-pyrolysis of lignin and plastics using red clay as catalyst in a micro-pyrolyzer // *Bioresour. Technol*. 2018. V. 270. P. 311–319.
70. Fatimah I., Rubiyanto D., Prakoso N.I. Green conversion of citral and citronellal using tris(bipyridine)ruthenium(II)-supported saponite catalyst under microwave irradiation // *Sustain. Chem. Pharm*. 2019. V. 11. P. 61–70.

71. Tarach K.A., Góra-Marek K., Martinez-Triguero J. Acidity and accessibility studies of desilicated ZSM-5 zeolites in terms of their effectiveness as catalysts in acid-catalyzed cracking processes // *Catal. Sci. Technol.* 2017. V. 7. P. 858–873.
72. Lewandowska A., Monteverdi S., Bettahar M., Ziolk M. MCM-41 mesoporous molecular sieves supported nickel-physico-chemical properties and catalytic activity in hydrogenation of benzene. // *J. Mol. Catal. A Chem.* 2002. V. 188. P. 85 - 95.
73. Datka J., Turek A.M, Jehng J.M, Wachs I.E // *Journal of Catalysis.* 1992. V. 135, P. 186.
74. Reddy C.R., Bhat Y.S., Nagendrappa G., Prakash B.S.J. Brønsted and Lewis acidity of modified montmorillonite clay catalysts determined by FT-IR spectroscopy// *Catalysis Today.* 2009.V.141. P.157-160.
75. Liu M., Zhuo J.K., Xiong S.J., Yao Q. Catalytic Degradation of High-Density Polyethylene over a Clay Catalyst Compared with Other Catalysts // *Energy & Fuels.* 2014. V.28. P. 6038–6045.
76. Харитонцев В.Б., Тиссен Е.А., Матвеев Е.С., Михайлов Я.А., Третьяков Н.Ю., Загоруйко А.Н., Ельшев А.В. Оценка эффективности катализаторов для процесса каталитического пиролиза полиэтилена // *Катализ в химической и нефтехимической промышленности.* 2023. Т. 23, № 2.С. 58-65.
77. Inayat A., Inayat A., Schwieger W., Sokolova B., Lestinsky P. Enhancing aromatics and olefins yields in thermo-catalytic pyrolysis of LDPE over zeolites: Role of staged catalysis and acid site density of HZSM-5// *Fuel.* 2022. V. 314. P.7-17.
78. Ren X., Cao J., Zhao X., Yang Z., Wang Y., Chen Q., Zhao M., Wei X. // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.* 2019. V.139. P. 22-30
79. He Y., Yan L., Liu Y., Liu Y., Bai Y., Wang J., Li F. // *Fuel Processing Technology.* 2019. V. 188. P. 70-78.

80. Ковалева Н. Ю., Раевская Е. Г., Рошин А. В.. Пиролиз пластиковых отходов. Обзор// CHEMICAL SAFETY SCIENCE. 2020. № 4. С. 48–79.
81. Агулло Х., Кумар Н., Беренгуер Д. Каталитический пиролиз полиэтилена низкой плотности на цеолитах H- β , H-Y, H-МОРДЕНИТ и H-ФЕРРЬЕРИТ. Влияние кислотности и структуры // Кинетика и катализ. 2007. Том 48. №4. С. 570-575.
82. Kartik S., Balsora H.K., Sharma M., Saptoro A. et al. // Thermal Science and Engineering Progress. 2022. V. 32.
83. Serra A.C.S., Milato J.V., Faillace J.G., Calderari M.R. // Braz. J. Chem. Eng. 2022. V.6. P. 3-17.
84. Fadillah G., Fatimah I., Sahroni I., Musawwa M.M. // Catalysts. 2021. V. 11. P.837
85. Melendez-Ortiz H.I., Garcia-Cerda L.A., Olivares-Maldonado Y. // Ceramics International. 2012. V. 38. P. 6353-6358.