

УДК 544.478-03, 544.478.32

Н. А. Забара, мл. науч. сотр., Д. Ж. Токмурзин, ст. науч. сотр.,  
Ф. П. Погоров, бакалавр, А. Е. Питерский, магистрант,  
А. К. Кайайдарова, докторант,  
С. А. Ефремов, д-р техн. наук, проф.,  
С. В. Нечипуренко, канд. техн. наук, доц.  
(НАО «КазНУ им. аль-Фараби», г. Алматы, Республика Казахстан)

## **ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОЛИПРОПИЛЕНА И ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА КАОЛИН-МОДИФИЦИРОВАННЫХ КАТАЛИЗАТОРАХ**

Начиная с 1950-ых годов производство пластика росло быстрыми темпами: если в 1950-ых годах было произведено около 1,7 млн. тонн пластика, то к 2020 общемировое производство пластиков достигло 367 млн. тонн, и, при стабильном росте производства, достигнет 590 млн. тонн к 2050 году [1, 2]. По данной причине, поиск экономически выгодных и устойчивых способов переработки пластика является актуальным вопросом: на 2022 год только 9% пластика перерабатывается, 34% сжигается для производства энергии, 40% захоранивается, а 17% находятся в нерегулированном состоянии [3].

Особую роль среди пластиков занимают и полипропилен (ПП) и полиэтилен высокого давления (ПВД) которые занимают 26,3% и 18,9% рынка пластиков соответственно, являясь самыми производимыми пластиками в мире [3]. Другой особенностью данных полимеров является сложность механической переработки, так как вторичная переработка не позволяет создавать изделия достаточного качества в сравнении с первичными пластиками [4].

Среди методов переработки пластиков наиболее используемыми являются механическая, термохимическая (пиролиз, крекинг, гидрокрекинг, газификация), химическая (сольволиз, метанолиз, гликолиз, фотолиз) и биологическая переработки. Оптимальным в соотношении стоимость/ценность продукта является термохимическая и химическая переработка [5–8].

Актуальным также является применение дешевых и эффективных катализаторов для термохимических процессов, что позволяет усилить преимущества данного вида переработки. В частности, катализаторы на основе природных минералов, часто оказываются дешевле катализаторов на основе синтетических носителей, хотя имеют более слабые характеристики [9].

Среди них, в частности, такие как доломит [10], глины (каолин, монтмориллонит) [11] и другие минералы.

Наиболее интересным минералом оказывается каолин, как в значительной степени дешевый и легкий в обработке носитель. Хотя, и не выделяясь особенно удельной площадью поверхности, но приемлемой силой кислотных центров, он оказывается достаточно эффективным в соотношении цена процесса/цена катализатора.

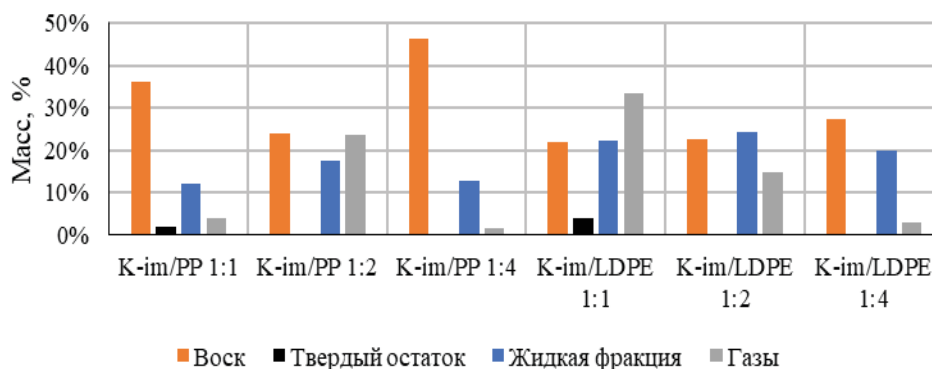
Был изготовлен катализатор на основе каолина, импрегнированный железом. В таблице наблюдается достижение 6% железа в катализаторе после импрегнации, а соотношение Si/Al, составляющее около 1,170, говорит о значительном количестве кислотных центров, играющих ключевую роль в процессе пиролиза пластика. Удельная площадь поверхности конечного материала составила 10,41 м<sup>2</sup>/г; объем пор 0,034 см<sup>3</sup>/г; размер пор 0,70 нм.

**Таблица – Изменение элементного состава катализатора на каждой из стадий приготовления**

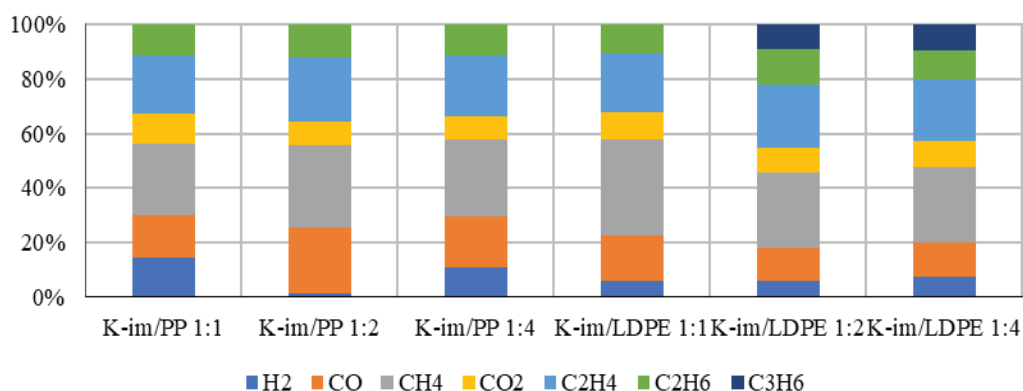
Элементы	Содержание, масс. %			
	Исходный	Прокаленный	Выщелачивание	Импрегниро-ванный
O	60,811	52,626	50,148	48,901
Al	17,250	18,655	17,665	16,608
Si	20,213	21,452	20,651	19,441
Fe	0,683	0,693	0,697	6,602

Для оценки влияния соотношения пластика и катализатора были взяты соотношения катализатор/пластик как 1:1, 1:2, 1:4. В частности, на рисунке 1 для ПП и ПВД наблюдается наибольший выход жидкой фракции для соотношения 1:2, наибольший выход газа же для ПВД наблюдается для соотношения 1:1.

Также заметен значительный выход воска для соотношения 1:4, что объясняется вероятнее всего соответствующими кинетическими ограничениями реакции. Состав же газовой фракции (рисунок 2) меняется незначительно для всех видов пластика и соотношения.

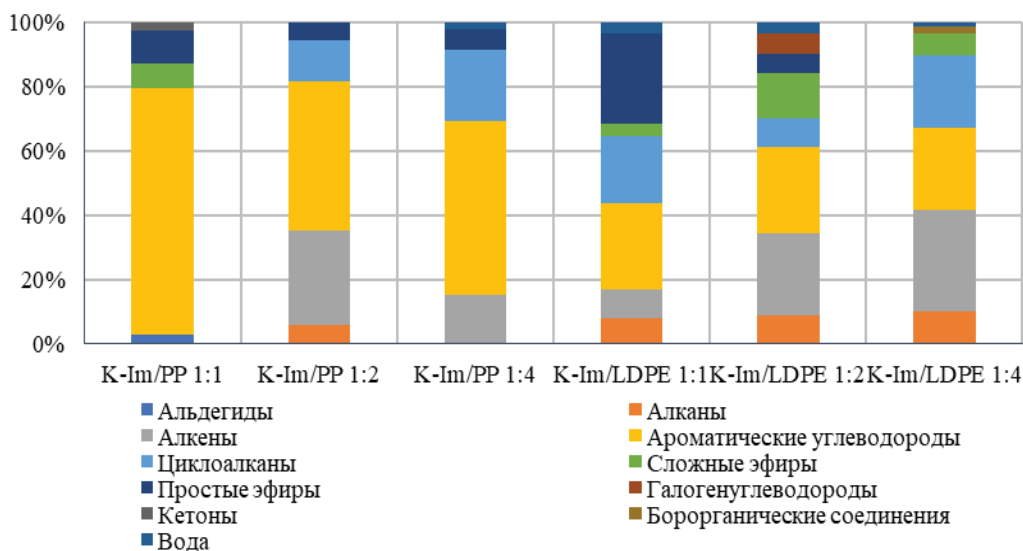


**Рисунок 1 – Соотношение выхода фракций пиролиза для ПП и ПВД в разных соотношениях с катализатором**



**Рисунок 2 – Состав газовой фракции пиролиза ПП и ПВД с использованием каолин-модифицированного катализатора**

Жидкая фракция (рисунок 3) отличается значительным разнообразием по классам органических веществ: полипропилен склонен к циклизации и дальнейшему дегидрированию до ароматических соединений, что подтверждает газовая фракция.



**Рисунок 3 – Состав жидкой фракции пиролиза ПП и ПВД с использованием каолин-модифицированного катализатора**

Из полученных результатов пиролиза наблюдается, что оптимальным соотношением катализатора к пластику является 1:2, которые позволяет получать наибольшее количество жидкой фракции.

В то же время, состав жидкой фракции, преимущественно у ПП содержит достаточно ценные продукты для дальнейшего нефтехимического синтеза. ПВД же дает наибольший выход алкенов и ароматических соединений при 1:4, что вероятно, может также считаться оптимальным несмотря на меньшее количество жидкой фракции в сравнении с 1:2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Geyer R., Jambeck J. R., Law K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3, № 7. – P. 1–5.
2. Hoang T. C. Plastic pollution: Where are we regarding research and risk assessment in support of management and regulation? // *Integrated Environmental Assessment and Management*. – 2022. – Vol. 18, № 4. – P. 851–852.
3. Houssini K., Li J., Tan Q. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis // *Communications Earth & Environment*. – 2025. – Vol. 6, № 1. – P. 257.
4. Silva R. J. D. O., Graf K., Leite Ribeiro Okimoto M. L. Plastic waste recycling: an overview of the mechanical, chemical, and thermal technologies // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2025. – Vol. 72, № 1. – P. 251.
5. A review of the pathways, limitations, and perspectives of plastic waste recycling / A. A. Hayder [et al.] // *Materials for Renewable and Sustainable Energy*. – 2025. Vol. 14, № 3. – P. 50.
6. Current Prospects for Plastic Waste Treatment / D. Damayanti [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, № 15. – P. 3133.
7. Jiang X., Bateer B. A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation // *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. – 2025. – Vol. 43, № 8. – P. 1159–1178.
8. A critical review and future perspective of plastic waste recycling / R. Tiwari [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2023. – Vol. 881. – Article. 163433.
9. The Fuel Production for Diesel Engine from Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste / P. Nattadon [et al.] // *Engineered Science*. – 2023. – Vol. 26. – P. 1–13.
10. Catalytic Co-Pyrolysis of Blended Biomass – Plastic Mixture Using Synthesized Metal Oxide(Mo)-Dolomite Based Catalyst / H. N. Hameed [et al.] // *SSRN Electron*. – 2022. – P. 1–33.
11. Hakeem I. G., Aberuagba F., Musa U. Catalytic pyrolysis of waste polypropylene using Ahoko kaolin from Nigeria // *Applied Petrochemical Research*. – 2018. – Vol. 8, № 4. – P. 203–210.