УДК: 544.478.02

ЖЕЛЕЗООКСИДНЫЙ КАТАЛИЗАТОР ДЛЯ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ

Dang Tran Tho, Le Thi Mai Huong, О.П. Смирнова, А.В. Афинеевский, Д.В. Смирнов, Н.Е. Гордина, Д.А. Прозоров

Dang Tran Tho, Le Thi Mai Huong

Институт по тепловой и холодильной технике, Ханой, Вьетнам Ольга Павловна Смирнова (ORCID 0009-0003-2941-5365) Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000 E-mail: smirnova_op@isuct.ru

Андрей Владимирович Афинеевский (ORCID 0000-0001-6933-5130), Дмитрий Владимирович Смирнов (ORCID 0000-0002-5550-3866)*, Дмитрий Алексеевич Прозоров (ORCID 0000-0002-1749-2828)

НИЛ Синтеза, исследований и испытания каталитических и адсорбционных систем для процессов переработки углеводородного сырья, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000 E-mail: afineevskiy@mail.ru, morgandvs37@gmail.com*

Наталья Евгеньевна Гордина (ORCID 0000-0002-1067-4688)

Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: gordinane@mail.ru

В данной работе для процессов гидрогенолиза продуктов пиролиза биомассы исследована каталитическая система на основе смеси оксидов железа, полученная из железосодержащего шлама. В качестве модельного сырья использовались терпены и борщевик Сосновского. Проведен анализ влияния железооксидного катализатора на состав жидких и газовых продуктов пиролиза. Исследованы текстурные и фазовые характеристики катализатора, а также его активность в процессах каталитической конверсии углеводородов. Экспериментальные исследования показали, что предложенный железооксидный катализатор способствует эффективному гидрогенолизу углеводородов, обеспечивая их частичное деструктивное гидрирование и изомеризацию. Определены наблюдаемые константы скорости конверсии пиролизных газов, выявлены основные продукты гидрогенолиза. Проведен сравнительный анализ химического состава продуктов пиролиза в присутствии и в отсутствие катализатора. Установлено, что в восстановительной среде оксиды железа (II) оказывают значительное влияние на состав продуктов пиролиза, способствуя увеличению степени превращения углеводородов и формированию узкого распределения конечных соединений. Проведенный анализ рентгенографических и сканирующих электронно-микроскопических данных подтвердил стабильность фазового состава катализатора при температурах до 500 °C. Дополнительно выявлено, что одним из продуктов пиролиза борщевика Сосновского является углеродный материал с развитой структурой, обладающий относительно высокой удельной поверхностью и пористостью. Анализ морфологии полученного материала позволил сделать вывод о его потенциальной пригодности для использования в качестве адсорбента или носителя катализатора. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего развития методов переработки биомассы, направленных на селективное получение ценных химических соединений, а также для разработки новых катализаторов на основе железосодержащих отходов, применимых в промышленных процессах гидрогенолиза и пиролиза.

Ключевые слова: оксид железа, гидрогенолиз, пиролиз, терпены, катализ, водород, селективное восстановление

IRON OXIDE CATALYST FOR BIOMASS PYROLYSIS PROCESS

Dang Tran Tho, Le Thi Mai Huong, O.P. Smirnova, A.V. Afineevskii, D.V. Smirnov, N.E. Gordina, D.A. Prozorov

Dang Tran Tho, Le Thi Mai Huong

Institute of Thermal and Refrigeration Engineering, Hanoi, Vietnam

Olga P. Smirnova (ORCID 0009-0003-2941-5365)

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

Andrei V. Afineevskiy (ORCID 0000-0001-6933-5130), Dmitrii V. Smirnov (ORCID 0000-0002-5550-3866)*, Dmitriy A. Prozorov (ORCID 0000-0002-1749-2828)

NIL Synthesis, research and testing of catalytic and adsorption systems for the processing of hydrocarbon raw materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: afineevskiy@mail.ru, morgandvs37@gmail.com*

Natalia E. Gordina (ORCID 0000-0002-1067-4688)

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia E-mail: gordinane@mail.ru

In this paper, a catalytic system based on a mixture of iron oxides obtained from an ironcontaining sludge is studied for the processes of hydrogenolysis of biomass pyrolysis products. Terpenes and Sosnovsky hogweed were used as model raw materials. The effect of an iron oxide catalyst on the composition of liquid and gas pyrolysis products is analyzed. The textural and phase characteristics of the catalyst, as well as its activity in the processes of catalytic conversion of hydrocarbons, are investigated. Experimental studies have shown that the proposed iron oxide catalyst promotes efficient hydrogenolysis of hydrocarbons, providing their partial destructive hydrogenation and isomerization. The observed rate constants of pyrolysis gases conversion have been determined, and the main products of hydrogenolysis have been identified. A comparative analysis of the chemical composition of pyrolysis products in the presence and absence of a catalyst has been carried out. It has been established that in a reducing medium, iron (II) oxides have a significant effect on the composition of pyrolysis products, contributing to an increase in the degree of conversion of hydrocarbons and the formation of a narrow distribution of final compounds. The analysis of X-ray and scanning electron microscopic data confirmed the stability of the phase composition of the catalyst at temperatures up to 500 °C. Additionally, it was revealed that one of the pyrolysis products of Sosnovsky hogweed is a carbon material with a developed structure, having a relatively high specific surface area and porosity. An analysis of the morphology of the obtained material allowed us to conclude that it is potentially suitable for use as an adsorbent or a catalyst carrier. The results obtained can be useful for the further development of biomass processing methods aimed at the selective production of valuable chemical compounds, as well as for the development of new catalysts based on iron-containing waste used in industrial processes of hydrogenolysis and pyrolysis.

Keywords: iron oxide, hydrogenolysis, pyrolysis, terpenes, catalysis, hydrogen, selective reduction

Для цитирования:

Dang Tran Tho, Le Thi Mai Huong, Смирнова О.П., Афинеевский А.В., Смирнов Д.В., Гордина Н.Е., Прозоров Д.А. Железооксидный катализатор для процесса пиролиза биомассы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 10. С. 109–116. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7244.

For citation:

Dang Tran Tho, Le Thi Mai Huong, Smirnova O.P., Afineevskii A.V., Smirnov D.V., Gordina N.E., Prozorov D.A. Iron oxide catalyst for biomass pyrolysis process. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2025. V. 68. N 10. P. 109–116. DOI: 10.6060/ivkkt.20256810.7244.

ВВЕДЕНИЕ

Пиролиз различных видов сырья уже длительное время используется для получения широкого спектра промышленных продуктов, включая биодизель [1, 2], ненасыщенные углеводороды [3-5], бензол [6], бутадиен [7] и другие соединения. В результате пиролиза образуются газовые и жидкие фракции, которые при различных режимах и катализаторах могут существенно различаться по химическому составу, даже при использовании одного и того же исходного материала. На химический состав продуктов пиролиза оказывают влияние многочисленные факторы, включая температуру, время термической обработки, конструктивные особенности реактора, присутствие инициаторов или каталитически активных металлов (как в виде примесей в сырье, так и в элементах конструкции реактора), а также гранулометрический состав исходного сырья.

Основной задачей исследований, посвященных пиролизу, является достижение высокой селективности процесса с целью получения целевых химических соединений. В большинстве случаев в качестве исходного сырья используются нефть, ее производные или биомасса [1-7]. Согласно литературным данным [8, 9], в качестве катализаторов-инициаторов применяют металлы, их оксиды и соли, природные силикаты, алюмосиликаты и цеолиты. В ряде научных работ [10-12] некоторые соединения, вводимые в сырье для снижения температуры пиролиза, обозначаются как катализаторы, тогда как корректнее их называть инициаторами термического разложения.

Подход к реализации пиролиза введением катализатора непосредственно в исходное сырье имеет ряд недостатков, среди которых неравномерность его распределения в реакторе, сложность выделения и повторного использования катализатора, возможность присутствия его компонентов в конечных продуктах пиролиза, а также значительный расход катализатора. Кроме того, возникают сложности при оценке его активности и селективности, а также при стандартизации методик измерения эффективности на различных установках. Оптимальным решением является использование катализатора не в камере пиролиза, а на выходе из нее, где он может быть применен для переработки газовой или жидкой фракции, устраняя большую часть перечисленных проблем при промышленной эксплуатации.

Целью настоящего исследования является разработка каталитических систем на основе оксида железа (III) для гидрогенолиза продуктов пиролиза с целью получения фракций с узким химическим составом. Исследование проведено на модельном сырье: а) смесь терпенов и б) борщевик Сосновского.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В ходе экспериментов использовались следующие вещества:

1. Скипидар (ГОСТ 1571-82);

2. Водород электролитический, марка Б (ГОСТ 3022-80);

3. Борщевик Сосновского (Ивановская область), высушенные на воздухе стебли и листья;

4. Железосодержащий шлам (Заволжский химический завод, Ивановская область, Россия).

Пиролиз биомассы проводился при максимальной температуре 900 °С со скоростью нагрева 4 °С/мин. Продукты пиролиза пропускались через слой катализатора при температуре 500 °С в атмосфере пиролизных газов и в среде водорода. Анализ химического состава продуктов реакции осуществлялся методом хромато-масс-спектрометрии с использованием хроматографа «Кристаллюкс-4000М» и масс-детектора «Маэстро-АМС». Разделение экстрагентов проводилось на капиллярной колонке TRB-PETROL (100 м \times 0,25 мм \times 0,5 мкм). Параметры программы анализа включали: время анализа – 60 мин, начальная температура колонок -35 °C с программированным нагревом до 150 °C (5 °С/мин), затем до 250 °С в течение оставшегося времени анализа; температура детектора составляла 270 °C; испарителя – 270 °C; объем пробы – 0,4 мкл; диапазон масс – от 2 до 1200 а.е.м.

В качестве катализатора в данной работе был предложен термообработанный железосодержащий шлам Заволжского химического завода. Шлам подвергался следующей термообработке: его сушили при 120 °С и прокаливали при 500 °С. Химический состав полученного материала представлен в табл. 1.

Удельная поверхность железосодержащего продукта составила 23,9±1,0 м²/г, пористость характеризовалась наличием мезо- и макропор и составляла 0,028±0,005 см³/г. Фазовый анализ показал, что продукт представляет собой смесь оксидов железа с примесями других металлов и их оксидов (см. табл. 1).

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, используемой для каталитической конверсии пиролизных газов.

Таблица 1

Элементный состав железооксидного катализатора Table 1 The elemental composition of the iron oxide catalyst

<i>Tuble 1.</i> The elemental composition of the from oxide catalyst												
Fe	С	0	Al	Si	Р	S	K	Ca	Ti	Pb	Cu	Mg
17,31	22,01	43,98	1,96	12,06	0,15	1,02	0,65	0,26	0,12	0,01	0,39	0,08

Таблица 2

Химический состав продуктов пиролиза скипидара и борщевика Сосновского в температурном интервале 250 – 500 °C

Table 2. Chemical composition of pyrolysis products of turpentine and Sosnowsky's hogweed in the temperature
range of $250 - 500$ °C

Скипидар ТУ 2416-014-57	7859009-2015	Борщевик Сосновского				
Соединение	мас. %	Соединение	мас. %			
ү-терпинен	1,21	1-гексанол	1,23			
α-пинен	74,80	α-пинен	7,16			
β-пинен	7,80	гексилацетат	2,33			
камфен	1,35	октилизовалерат	2,70			
лимонен	3,41	октилацетат	0,55			
гераниол	2,32	двухатомные спирты	4,11			
цитронеллаль	1,55	трехатомные спирты	1,89			
цитраль	1,97	газовая фракция: CH4; C2H4; C3H8; CO2	3,05			
β-фелландрена	1,4	ароматические углеводороды	2,99			
нерол	0,45	алифатические углеводороды	13,47			
мирцен	0,79	вода	60,52			
ароматические углеводороды	1,95	-	-			
алифатические углеводороды	1,01	-	-			
вода	менее 0,002	-	-			



Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 – реактор с катализатором; 2 – нагревательный элемент; 3 – пиролизный реактор; 4 – слой катализатора; 5 – кран дозатор для отбора проб на хромато-масс спектрометрический анализ; 6 – пиролизная печь

Fig. 1. Experimental setup. 1 – reactor with catalyst; 2 – heating element; 3 – pyrolysis reactor; 4 – catalyst bed; 5 – dosing valve for sampling for chromatograph mass spectrometric analysis; 6 – pyrolysis furnace

Рентгенофазовый анализ проводили, используя дифрактометр Bruker D8 Advance с СиКа – излучением ($\lambda = 0,15406$ нм, напряжение 40 кВ, 20 мА, углы снятия 2 $\Theta = 10 - 90^\circ$, скорость сканирования 3°/мин, дискретность – 0,01°). Расшифровка рентгенограмм производилась с использованием баз данных American Mineralogist Crystal Structure Database и кристаллографической базы данных МИНКРИСТ.

Микрофотографии и химический состав получены с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN с приставкой для энергодисперсионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выбор модельных соединений для исследований процессов пиролиза и гидрогенолиза обусловлен следующими факторами. Количество научных работ, посвященных пиролизу борщевика Сосновского, сравнительно невелико [13-15]. При этом состав продуктов его пиролиза значительно отличается от продуктов пиролиза любого другого сырья (см. табл. 2).

Химический анализ продуктов пиролиза борщевика Сосновского свидетельствует о потенциальной возможности получения ряда ценных соединений, включая спирты и различные кислородсодержащие ненасыщенные вещества [10]. Пиролиз биомассы, в зависимости от ее природы, приводит к формированию широкого спектра соединений, предсказать состав которых заранее достаточно сложно. Также возможность применения катализаторов на основе железосодержащих отходов для частичного деструктивного гидрирования и изомеризации пиролизных фракций проверялась на соединениях терпенового ряда. Химический состав исходного сырья (борщевик Сосновского и скипидар) представлен в табл. 2.

В ходе работы были изучены текстурные характеристики железооксидного катализатора. На рис. 2 представлены рентгенограммы катализатора на различных стадиях переработки продуктов пиролиза.

Анализ полученных данных позволяет заключить, что в среде водорода в температурном диапазоне 250 – 500 °С исследуемая каталитическая система не претерпевает значительных фазовых переходов. В основном наблюдается восстановление отдельных примесей металлов. Также процессы конверсии продуктов пиролиза практически не оказывают влияния на морфологию поверхности катализатора (см. рис. 3).

В отсутствие водорода оксиды железа (II) практически не оказывают влияния на продукты пиролиза. В табл. 3 приведен химический состав продуктов пиролиза с использованием каталитической конверсии в атмосфере водорода.



Рис. 2. Рентгенограмма железосодержащего катализатора: I – свежий катализатор (до пиролиза); II –после процесса пиролиза в атмосфере пиролизных газов при 500 °C; III –после процесса пиролиза в восстановительной среде при 500 °C. Фазы: 1 – Fe; 2 – Fe_{3,005}O₄; 3 – гетит α-FeO(OH). База данных:

American Mineralogist Crystal Structure Database

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of iron-containing catalyst: I – fresh catalyst (before pyrolysis); II – after pyrolysis process in pyrolysis gas atmosphere at 500 °C; III – after pyrolysis process in reducing environment at 500 °C. Phases: 1 – Fe; 2 – Fe_{3.005}O4;

3 – goethite α-FeO(OH). Database: American Mineralogist Crystal Structure Database

ChemChemTech. 2025. V. 68. N 10

Степень превращения продуктов пиролиза в испытанных каталитических системах составила 0,95 для борщевика Сосновского и 0,47 для скипидара. Расчет степеней превращения осуществлялся на основе данных газовой хроматографии как отношение суммы пиков, соответствующих исходным соединениям, к сумме пиков, отвечающих за продукты гидрогенолиза. Помимо гидрогенолиза, в процессе также протекают изомеризационные реакции, что подтверждается экспериментальными данными и согласуется с литературными источниками [16-19].





Рис. 3. Микрофотографии (РЭМ) железооксидного катализатора до (а) и после (б) процесса конверсии модельных смесей (в атмосфере водорода). Условия съемки: контраст по топографии; размер видимого поля 15,6 мкм²; напряжение 5 кВ Fig. 3. Micrographs (SEM) of iron oxide catalyst before (a) and after (б) the process of model mixture conversion (in hydrogen atmosphere). Shooting conditions: topography contrast; visible field size 15.6 µm²; voltage 5 kV

Активность предложенной каталитической системы в процессе конверсии продуктов пиролиза в проточном реакторе оценивается степенью превращения углеводородов. Однако точное определение скорости реакции затруднено из-за сложного характера протекающих процессов и отсутствия возможности контроля времени нахождения углеDang Tran Tho и др.

водородов в зоне реакции. Тем не менее, наблюдаемую константу скорости конверсии углеводородов в проточном реакторе можно рассчитать по уравнению (1), применимому для реакторов идеального вытеснения [20]:

$$k = \frac{1}{\tau} ln \frac{1}{1-\alpha}, c^{-1}, \qquad (1)$$

где α – степень превращения, τ – время контакта, рассчитываемое на основе отношения объема реактора к объемной скорости потока.

Степень превращения (α) при рассмотрении процесса каталитической конверсии продуктов пиролиза определялась на основании изменения состава продукта, исходя из данных хроматографического анализа. Время нахождения продуктов пиролиза в зоне протекания каталитического процесса определяли в отдельном эксперименте волюмометрическим методом и рассчитывали, исходя из прохождения 370 см³ пиролизного газа в 1 мин через слой катализатора заданного объема.

Наблюдаемые константы скорости конверсии пиролизных газов борщевика Сосновского составили 5,582 с⁻¹, а для смеси терпенов – 1,477 с⁻¹.

Помимо жидких и газовых продуктов пиролиза, в температурном интервале 250 – 500 °C борщевик Сосновского образует углеродный материал с развитой структурой (см. рис. 4). Элементный состав золы приведен в табл. 4. Тем не менее нужно учитывать, что химический состав золы может меняться в зависимости от места сбора сырья.

Таблица 3

Химический состав продуктов пиролиза скипидара и борщевика Сосновского в температурном интервале 250 – 500 °C с применением каталитической конверсии в атмосфере водорода *Table 3.* Chemical composition of pyrolysis products of turpentine and Sosnowsky's hogweed in the temperature

range of 250 – 500 °C using catalytic conversion in a hydrogen atmosphere									
Скипидар	Борщевик Сосновского								
Соединение	мас. %	Соединение	мас. %						
Циклогексан	0,72	Гексан, 2-метил-	2,88						
Циклогексан, 1,2-диметил-, цис-	0,75	Гексан, 2-метил-							
Циклогексан, метил-	0,23	Гексан, 3-метил-	0,11						
Гептан, 2-метил-	0,44	Бутан, 1-(этенилокси)-3-метил-	4,32						
Циклогексан, 1,4-диметил-, транс-	1,38	Гептан	16,78						
α-Пинен	42,30	Уксусная кислота	4,56						
Бицикло[3.1.1]гептан, 6,6-диметил-2-мети- лен-, (1S)-	2,31	2-Пропанон, 1-гидрокси-	6,70						
3-Карен	3,41	Пропановая кислота	15,23						
D-Лимонен	2,55	Бутановая кислота, 2-оксо-	10,33						
Циклогексен, 3-метил-6-(1метилэтилиден)-	5,52	Бутиролацетон	2,69						
-	-	Фенол, 2-метокси-	1,33						
-	-	Фенол, 3,4-диметокси-	3,55						
Не идентифицированные соединения	40,39	Не идентифицированные соединения	31,52						





Рис. 4. Микрофотографии (РЭМ) золы после процесса пиролиза борщевика Сосновского при максимальной температуре 500 °C. Условия съемки: контраст по топографии; размер видимого поля (a) 1,54 мм (б) 157 мкм; ускоряющее напряжение 5кВ Fig. 4. Micrographs (SEM) of ash after the pyrolysis process of Sosnowsky's hogweed at a maximum temperature of 500 °C. Shooting conditions: topographic contrast; visible field size (a) 1.54 mm (b) 157 µm; accelerating voltage 5 kV

Таблица 4

Элементный состав золы после процесса пиролиза борщевика Сосновского при 500 °C *Table 4.* Elemental composition of ash after pyrolysis of Sosnovsky hogweed at 500 °C

Fe	С	0	Al	Si	Р	S	Na	Ca	K	Mg
0,19	74,95	16,36	0,23	1,0	1,06	0,14	0,07	4,61	0,81	0,57

На рис. 5 представлены изотермы низкотемпературной адсорбции/десорбции азота и распределение пор по радиусу для остатка после пиролиза борщевика Сосновского. Расчеты были выполнены с применением модели Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Несмотря на относительно высокую удельную поверхность ($82 \pm 1,2 \text{ м}^2/\Gamma$), в полученном продукте практически отсутствуют мезопоры с диаметром более 10 нм.



Рис. 5. Изотермы адсорбции/десорбции азота и распределение пор по размеру золы борщевика Сосновского после пиролиза при температуре 550 °C. (а) Р/Р⁰ – отношение давления азота в системе к давлению конденсации; V – объем десорбированного азота при нормальной температуре десорбции; I – кривая адсорбции; II – кривая десорбции; (б) D – диаметр пор Fig. 5. Nitrogen adsorption/desorption isotherms and pore size distribution of Sosnowsky's hogweed ash after pyrolysis at 550 °C. (a) P/P⁰ is the ratio of the nitrogen pressure in the system to the condensation pressure; V is the volume of desorbed nitrogen at normal desorption temperature; I is the adsorption curve; II is the desorption curve; (б) D is the pore diameter

Изотермы во всех случаях можно отнести к IV и V типу по классификации С. Брунауэра. На всех изотермах присутствует резкий рост величины адсорбции при низких концентрациях азота, что говорит о наличии относительно небольшого числа микропор в образце. Объем пор с радиусом меньше 94,6 нм составил соответственно 0,084 см³/г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные демонстрируют возможность использования различных железосодержащих отходов, включая, например, красный шлам, в качестве катализаторов для конверсии продуктов пиролиза биомассы. Установлено, что предложенная каталитическая система эффективно способствует гидрогенолизу ненасыщенных соединений как в жидкой, так и в газообразной фазах, обеспечивая степень превращения 0,95 для борщевика Сосновского и 0,47 для модельной смеси терпенов.

Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация селективности каталитического пиролиза за счет введения промотирующих добавок, очистки катализатора от нежелательных примесей металлов, а также разработки оптимальных условий конверсии (включая предварительное разделение жидких углеводородов перед процессом каталитической обработки) [21].

Кроме того, в ходе пиролиза борщевика Сосновского образуется углеродный материал с развитой пористой структурой ($S_{yg} = 82 \pm 1,2 \text{ м}^2/\text{г}$ и пористость 0,084 см³/г), обладающий потенциалом применения в качестве адсорбента.

БЛАГОДАРСНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2024-481.

The work was carried out with the support of the Russian Ministry of Education and Science, Agreement No. 075-15-2024-481.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

Dang Tran Tho и др.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Федоришин А.С., Стрелко В.В., Ставицкая С.С., Яковлев В.П., Цыба Н.Н., Мильграндт В.Г. // Журн. приклад. химии. 2010. Т. 83. № 2. С. 282-287.
- Su G., Ong H.C., Mofijur M., Mahlia T.I., Ok Y.S. // J. Hazard. Mater. 2022. V. 424. P. 127396. DOI: 10.1016/ j.jhazmat.2021.127396.
- Wang G., Dai Y., Yang H., Xiong Q., Wang K., Zhou J., Yunchao L., Wang S.A. // *Energy Fuels*. 2020. V. 34. N 12. P. 15557-15578. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03107.
- 4. Трегер Ю.А., Розанов В.Н. // Газохимия. 2010. № 2. С. 44-50.
- 5. Цуканов М.Н. // Universum: техн. науки. 2021. № 4. С. 58-62.
- Gaurh P., Pramanik H. // Waste Manag. 2018. V. 77. P. 114-130. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.05.013.
- Yang Q., Yu S., Zhong H., Liu T., Yao E., Zhang Y., Zou H., Du W. // J. Hazard. Mater. 2021. V. 401. P. 123302. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123302.
- 8. Цыганова Е.И., Шекунова В.М., Александров Ю.А., Филофеев С.В., Лелеков В.Е. // Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Химия». 2016. Т. 8. № 3. С. 19-27.
- Wang S., Wan Z., Han Y., Jiao Y., Li Z., Fu P., Li N., Zhang A., Yi W. // J. Environ. Chem. Eng. 2023. V. 11. P. 109113. DOI: 10.1016/j.jece.2022.109113.
- Venderbosch R.H. // ChemSusChem. 2015. V. 8. N 8. P. 1306-1316. DOI: 10.1002/cssc.201500115.
- Ren X., Ghazani M.S., Zhu H., Ao W., Zhang H., Moreside E., Zhu J., Yang P.J., Zhong N., Bi X. // Appl. Energy. 2022. V. 315. P. 118970. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118970.
- 12. Нехаев А.И., Максимов А.Л. // *Нефтехимия*. 2021. Т. 61. № 1. С. 21-42. DOI: 10.31857/S0028242121010020.
- Полина И.Н., Миронов М.В., Белый В.А., Броварова О.В. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 68-76. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6462.
- 14. Евстигнеев Э.И., Закусило Д.Н., Рябухин Д.С., Васильев А.В. // Усп. химии. 2023. Т. 92. № 8. С. 1-16.
- Мусорина Т.А., Наумова Е.А., Шонина Е.В., Петриченко М.Р., Куколев М.И. // Вести. МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 12. С. 1555–1571. DOI: 10.22227/1997-0935. 2019.12.1555-1571.
- Toma S.H., Nogueira H.P., Avanzi L.H., dos Santos Pereira R., Ferreira L. F. P., Araki K., Cella R., Toyama M.M. // *RSC Adv.* 2021. V. 11. N 23. P. 14203-14212. DOI: 10.1039/D1RA00012H.
- Garhwal S., Kaushansky A., Fridman N., de Ruiter G. // Chem. Catal. 2021. V. 1. N 3. P. 631-647. DOI: 10.1016/ j.checat.2021.05.002.
- 18. Дворецкая А.Н., Аниканова Л.Г., Дворецкий Н.В. // Катализ в промышл. 2022. Т. 22. № 5. С. 6-14. DOI: 10.18412/1816-0387-2022-5-6-14.
- Rostovshchikova T.N., Smirnov V.V., Tsodikov M.V., Bukhtenko O.V., Maksimov Yu.V., Kiseleva O.I., Pankratov D.A. // Russ Chem Bull. 2005. V. 54. P. 1418–1424. DOI: 10.1007/s11172-005-0421-2.
- Агеева Е.В. Расчет химических реакторов. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т. 2016. 38 с.
- Сахибгареев С.Р., Цадкин М.А.,Бадикова А.Д., Гумерова Э.Ф. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 64-73. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6535.

REFERENCES

- Fedorishin A.S., Strelko V.V., Stavickaya S.S., Yakovlev V.P., Tsiba N.N., Milgrandt V.G. // J. Appl. Chem. 2010. V. 83. N 2. P. 282-287 (in Russian).
- Su G., Ong H.C., Mofijur M., Mahlia T.I., Ok Y.S. // J. Hazard. Mater. 2022. V. 424. P. 127396. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127396.
- Wang G., Dai Y., Yang H., Xiong Q., Wang K., Zhou J., Yunchao L., Wang S.A. // Energy Fuels. 2020. V. 34. N 12. P. 15557-15578. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c03107.
- 4. **Treger Yu.A., Rozanov V.N.** // *Gazokhimiya*. 2010. N 2. P. 44-50 (in Russian).
- 5. **Tsukanov M.N.** // Universum: Tekhn. Nauki. 2021. N 4. P. 58-62 (in Russian).
- Gaurh P., Pramanik H. // Waste Manag. 2018. V. 77. P. 114-130. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.05.013.
- Yang Q., Yu S., Zhong H., Liu T., Yao E., Zhang Y., Zou H., Du W. // J. Hazard. Mater. 2021. V. 401. P. 123302. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123302.
- Tsigankova E.I., Shekunova V.M., Aleksandrov Yu.A., Filofeev S.V., Lelekov V.E. // Vestn. YuUrGU. Ser. Khimiya. 2016. V. 8. N 3. P. 19-27 (in Russian).
- Wang S., Wan Z., Han Y., Jiao Y., Li Z., Fu P., Li N., Zhang A., Yi W. // J. Environ. Chem. Eng. 2023. V. 11. P. 109113. DOI: 10.1016/j.jece.2022.109113.
- Venderbosch R.H. // ChemSusChem. 2015. V. 8. N 8. P. 1306-1316. DOI: 10.1002/cssc.201500115.
- Ren X., Ghazani M.S., Zhu H., Ao W., Zhang H., Moreside E., Zhu J., Yang P.J., Zhong N., Bi X. // Appl. Energy. 2022. V. 315. P. 118970. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118970.
- Nehaev A.I, Maksimov A.L. // Neftekhimiya. 2021. V. 61. N 1. P. 21-42 (in Russian). DOI: 10.31857/S0028242121 010020.
- Polina I.N., Mironov M.V., Belyy V.A., Brovarova O.V. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. J. 2022. V. 65. N 5. P. 68-76. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6462.
- Evstigneev E.I., Zakusilo D.N., Ryabukhin D.S., Vasil'ev A.V. // Usp. Khimii. 2023. V. 92. N 8. P. 1-16 (in Russian).
- Musorina T.A., Naumova E.A., Shonina E.V., Petrichenko M.R., Kukolev M.I. // Vestn. MGSU. 2019.
 V. 14. N 12. P. 1555–1571 (in Russian). DOI: 10.22227/ 1997-0935.2019.12.1555-1571.
- Toma S.H., Nogueira H.P., Avanzi L.H., dos Santos Pereira R., Ferreira L. F. P., Araki K., Cella R., Toyama M.M. // *RSC Adv.* 2021. V. 11. N 23. P. 14203-14212. DOI: 10.1039/D1RA00012H.
- Garhwal S., Kaushansky A., Fridman N., de Ruiter G. // Chem. Catal. 2021. V. 1. N 3. P. 631-647. DOI: 10.1016/ j.checat.2021.05.002.
- Dvoretskaya A.N., Anikanova L.G., Dvoretskii N.V. // Kataliz Promyshl. 2022. V. 22. N 5. P. 6-14 (in Russian). DOI: 10.18412/1816-0387-2022-5-6-14.
- Rostovshchikova T.N., Smirnov V.V., Tsodikov M.V., Bukhtenko O.V., Maksimov Yu.V., Kiseleva O.I., Pankratov D.A. // Russ Chem Bull. 2005. V. 54. P. 1418–1424. DOI: 10.1007/s11172-005-0421-2.
- 20. **Ageeva E.V.** Calculation of chemical reactors. Kursk: Yugo-zapad. Gos. univ. 2016. 38 p. (in Russian).
- Sakhibgareev S.R., Tsadkin M.A., Badikova A.D., Gumerova E.F. // ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 9. P. 64-73. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6535.

Поступила в редакцию (Received) 28.02.2025 Принята к опубликованию (Accepted) 24.03.2025