

С. Р. Сахибгареев (к.х.н., доц.)¹, А. Д. Бадикова (д.т.н., проф., зав. каф.)¹, М. Р. Султанова (асс.)¹,
А. Г. Мустафин (д.х.н., проф.)^{1,2}, Л. Р. Ганиев (студ.)¹, О. В. Дедкова (студ.)¹

КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА БЕНЗИНА ТЕРМИЧЕСКОГО КРЕКИНГА В РАСПЛАВЕ КАТАЛИЗАТОРА

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра физической и органической химии

450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1; e-mail: samat.sax2014@yandex.ru

² Уфимский Институт химии Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
лаборатория органических функциональных материалов
450054, г. Уфа, пр. Октября, 71

S. R. Sakhibgareev¹, A. D. Badikova¹, M. R. Sultanova¹,
A. G. Mustafin^{1,2}, L. R. Ganiev¹, O. V. Dedkova¹

CATALYTIC PROCESSING THERMAL CRACKING GASOLINE IN A MELT CATALYST

¹ Ufa State Petroleum Technological University

1, Kosmonavtov Str., 450064, Ufa, Russia; e-mail: samat.sax2014@yandex.ru

² Ufa Institute of Chemistry of the Ufa Federal Research Center of the RAS
71, Prospect Oktyabrya Str., 450054, Ufa, Russia

Определены условия эффективной каталитической конверсии бензина термического крекинга в газообразные продукты с выявлением оптимальных температурных условий в реакционной зоне и скоростных режимов подачи сырья при осуществлении процесса по схеме барботажа через слой расплавленного катализатора NaFeCl₄. Исследование эффективности и селективности изучаемого процесса осуществлялось путем оценки таких показателей, как выход газообразных и жидких углеводородов, а также минимальной вероятности реакций коксообразования, в зависимости от заданных экспериментальных условий. Показано, что при оптимальной объемной скорости подачи сырья 2 ч⁻¹ в температурном диапазоне 400–500 °C наблюдается рост конверсии сырья в продукты от 36 до 75 % мас., однако дальнейшее повышение температуры не приводит к повышению эффективности процесса, вызывает некоторое увеличение вклада процессов молекулярной конденсации, полимеризации и образования высокоуглеродных темных побочных продуктов. Также в этом диапазоне достигается максимальное образование легких олефинов состава C₂–C₃, а выход газообразных ненасыщенных циклических углеводородов достигает максимума – более 43% мас. при 400 °C.

Ключевые слова: барботажная система; бензин термического крекинга; газообразование; жидкая фракция; каталитический крекинг; расплав катализатора.

This article is devoted to identifying the conditions for efficient catalytic conversion of thermally cracked gasoline into gaseous products with the identification of optimal temperature conditions in the reaction zone and feedstock feed rate modes when implementing the process according to the bubbling scheme through a layer of molten NaFeCl₄ catalyst. The study of the efficiency and selectivity of the process under study was carried out by assessing such indicators as the yield of gaseous and liquid hydrocarbons, as well as the minimum probability of coke formation reactions depending on the specified experimental conditions. It was revealed that at an optimal feedstock feed rate of 2 h⁻¹ in the temperature range of 400–500 °C, an increase in feedstock conversion into products from 36 to 75 % wt. is observed, however, a further increase in temperature does not lead to an increase in the process efficiency, causes a slight increase in the contribution of molecular condensation, polymerization and the formation of high-carbon dark by-products. Also in this range, the maximum formation of light olefins of the composition C₂–C₃ is achieved, and the yield of gaseous unsaturated cyclic hydrocarbons reaches a maximum – more than 43% by weight at 400 °C.

Key words: bubbling system; catalytic cracking; catalyst melt; gas formation; liquid fraction; thermal cracking gasoline.

Дата поступления 18.09.24

Приоритетными задачами на современном уровне развития химической технологии являются: повышение энергоэффективности технологических процессов, снижение капитальных и эксплуатационных производственных затрат, увеличение рентабельности предприятий за счет роста технико-экономических показателей, повышение селективности и выхода целевых продуктов высокого качества, обеспечение безопасности и экологичности технологических установок ^{1–3}.

В настоящее время каталитический крекинг является одним из наиболее крупнотоннажных промышленных процессов в нефтепереработке ^{4–7}. Характерными особенностями каталитического крекинга являются: избирательная активность к различным типам углеводородного сырья, высокая скорость протекания реакций, селективное образование насыщенных и ненасыщенных циклических углеводородов ^{5, 8}. Низшие газообразные олефины, образующиеся при термokatалитическом расщеплении углеводородного сырья, такие как этилен, пропилен, бутилен и изобутилен, являются важными мономерами для нефтехимии. Расширение сырьевых возможностей каталитических процессов нефтепереработки за счет вовлечения вторичного сырья и использования активных каталитических форм представляет собой актуальную задачу, позволяющую как обеспечивать внутренние производственные циклы предприятий дополнительными источниками легких сырьевых фракций, так и ориентировать получаемую продукцию термokatалитических процессов на получение углеводородов для малотоннажных нефтехимических процессов ^{9–12}. Осуществление таких процессов возможно в широком диапазоне варьирования экспериментальных условий использования как форм катализатора – от гранул до расплавов, так и схем подачи сырья – от проточной до барботажной, с изменением температурных параметров и скоростных режимов подачи сырья ^{13–15}.

В связи с этим представляется актуальной разработка новых каталитических систем, эффективных для решения задач термодеструктивного расщепления вторичного углеводородного сырья. Предварительными исследованиями было показано, что такой задаче отвечает катализатор, полученный эквимольным спеканием хлоридов натрия и железа (III валентного) с получением тетрахлорферрата натрия. В условиях эксперимента этот комплекс находится в расплавленном состоянии, в связи с чем аппаратурная обвязка реакционной зоны была ориентирована на барботажную схему подачи сырья через слой катализатора. Показано, что подобные каталитические процессы в условиях барботажа через слой расплава позволя-

ют доводить эффективность и селективность процесса до величин, эквивалентных традиционным схемам каталитических процессов ^{4,13,14}.

В ряде процессов термokatалитического расщепления различного углеводородного сырья ¹ в среде неорганических расплавов выявлена возможность эффективного увеличения выхода газобразной фракции с получением ненасыщенных и циклических углеводородов изомерного строения увеличением глубины конверсии исходного сырья. Температурный интервал процесса варьируется от 400 до 600 °C, время контакта сырья от 0.1 до 3.0 с.

Использование в качестве реакционной среды неорганических расплавов позволяет также решить типичную для высокотемпературных деструктивных процессов проблему коксообразования за счет снижения температуры. Также представляется важным наличие ряда преимуществ применения технологии барботажного слоя жидкого катализатора, включающих высокую теплопроводность расплава, упрощение подвода и отвода теплоты, возможность предотвращения местных перегревов.

Целью данной работы является исследование термokatалитических превращений бензина термического крекинга в интервале температур 400–500 °C при постоянной скорости подачи сырья 2 ч⁻¹ через слой расплавленного катализатора NaFeCl₄ в барботажной системе.

Методика проведения эксперимента

Для проведения термokatалитической деструкции углеводородного сырья использовался расплав катализатора NaFeCl₄. Тетрахлорферрат натрия был получен сплавлением эквимольных количеств хлорида натрия квалификации «хч» ГОСТ 4233-77 и безводного хлорида железа (III) ГОСТ-4147-74, где массовые доли обоих компонентов составляли не менее 99.9% мас.

Для спекания двойной соли тетрахлорферрата натрия в колбу с перемешивающим устройством помещалась шихта исходных безводных солей NaCl и FeCl₃. После этого колба погружалась в масляную баню, в которой поддерживалась эвтектическая для данной солевой смеси температура 313±1 °C. Синтез двойной соли осуществлялся при постоянном перемешивании до образования расплава. Спекание проводилось до образования однородной массы в течение 15–20 мин. После достижения визуальной однородности расплав считался готовым для проведения экспериментальных исследований в каталитических термодеструктивных процессах.

В качестве сырья использовался бензин регламентного процесса термического крекинга мазута Западно-Сибирской нефти.

Сырье подавалось с помощью перистальтического насоса типа РР-2-1Б в печь предварительного нагрева, после чего сырье поступало в нижнюю часть реактора с расплавленным слоем катализатора через систему термостойких стеклянных капилляров. Обогрев реакционной зоны осуществлялся с помощью лабораторной трубчатой печи РТФ 12/50/250. Контроль температуры осуществлялся с помощью термопары и регистрировался самопишущим потенциометром. Продукты деструкции улавливались и конденсировались в системе холодильников, жидкий продукт поступал в приемник конденсата. Газообразные продукты, пройдя через ловушку, поступали барабанный счетчик с жидкостным затвором.

Анализ состава газообразных продуктов осуществлялся на газовом хроматографе Хроматэк - Кристалл 5000 с капиллярной колонкой с использованием детектора ДТП. Жидкие продукты анализировались на хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2020 с применением капиллярной колонки Rxi-5 ms.

Результаты и их обсуждение

В ходе экспериментов были изучены закономерности термодеструктивного расщепления бензина термического крекинга в присутствии расплава двойной соли NaFeCl_4 .

Групповой фракционный состав исследуемого сырья – бензина термического крекинга представлен в табл. 1.

Таблица 1
Состав бензина термического крекинга

Наименование	Объем, % бензина (10–175 °С)			
	Парафины	Нафены	Олефины	Ароматические углеводороды
Бензин термического крекинга	53.0	14.0	30.0	3.0

При проведении термодеструктивного расщепления бензина термического крекинга в температурном диапазоне 400–500 °С в расплаве катализатора NaFeCl_4 было установлено, что в диапазоне скоростей 1–3 ч⁻¹ оптимальным скоростным режимом подачи сырья являются условия, отвечающие времени контакта сырья с катализатором – 2 ч⁻¹. При уменьшении времени контакта сырья с катализатором не достигается достаточной эффективности термодеструктивного процесса, в то время как увеличение времени контакта со снижением скорости подачи сырья вызывает

некоторое увеличение вклада реакций нецелевого характера и коксообразование (преимущественно при высоких температурах) несколько возрастает.

Температурный диапазон выбирался, исходя из величин выхода целевых продуктов, и был ограничен пределами 400–500 °С. Установлено, что при температурах ниже 400 °С снижается суммарная конверсия сырья, а при температурах выше 500 °С состав продуктов расширяется и включает более широкий спектр нецелевых продуктов.

В табл. 2 представлены результаты изучения компонентного состава газовой и жидкой фракций термодеструктивного расщепления бензина термического крекинга при температуре 400 °С.

Таблица 2
Состав газовой и жидкой фазы термодеструктивного расщепления бензина термического крекинга при 400 °С

Компонент	Время мин	Выход, % мас.
Газообразные продукты		
Метан	3.317	2.54
Этан	3.895	3.61
Этилен	4.140	6.27
Пропилен	6.594	7.33
Циклобутен	8.886	11.41
Бутан	10.836	34.82
Циклобутан	11.472	18.51
2,2-диметилпропан	14.132	15.51
Жидкая фракция		
2,3-Диметилбутан	2.016	11.42
2,2,3-Триметилпентан	2.138	5.28
2,3-Диметилбутан	2.214	3.05
2,2-Диметилпентан	2.265	2.3
Метилциклопентан	2.315	12.67
Циклогексан	2.614	21.46
транс-1,2-Диметилциклопентан	2.717	20.43
Метилциклогексан	2.979	12.57
1-Этил-2-метилциклопентан	3.097	6.48
Толуол	3.317	1.15
цис-1,4-Диметилциклогексан	3.411	1.22
1,1-Диметилциклогексан	3.481	0.61
1,2-Диметилциклогексан	3.569	0.59
1,1,3-Триметилциклогексан	3.629	0.37
3,3-Диметил-1-октен	3.883	0.4

Уже при данной относительно невысокой температуре суммарная конверсия сырья составила 41%. Экспериментальное соотношение газовой и конденсированных жидких продуктов термодеструктивного превращения бензина термического крекинга при данной температуре составило 30.64% мас. для газа и 69.36% мас. для жидкой фракции продуктов.

В газообразных продуктах преобладают алифатические углеводороды нормального строения, а также до 18.51% мас. насыщенных и 11.41% мас. ненасыщенных циклических соединений. Состав

жидкой фракции в основном представлен насыщенными углеводородами изомерного строения и циклическими структурами.

Коксообразование при выбранном рабочем режиме процесса практически не наблюдается и выход коксобруктов не превышает 0.01% мас.

В табл. 3 приведены результаты исследований состава газовой и жидкой фракций термокаталитической деструкции бензина термического крекинга при температуре 450 °С.

Таблица 3
Состав газовой и жидкой фазы термокаталитического крекинга бензина термического крекинга при 450 °С

Компонент	Время мин	Выход, % мас.
Газообразные продукты		
Водород	1.537	0.15
Метан	3.319	9.43
Этан	3.889	8.69
Этилен	4.165	11.27
Пропан	6.426	2.60
Пропилен	6.583	12.33
Циклобутен	8.882	9.41
Бутан	10.851	18.35
Циклобутан	11.488	7.92
2-Метилбутан	14.136	10.87
2,2-Диметилпропан	14.412	8.98
Жидкая фракция		
Метилциклопентан	2.323	12.14
Циклогексан	2.536	2.59
10-Метил-1-ундецен	2.688	11.77
1,2-Диметилциклопентан	2.773	7.70
Метилциклогексан	3.092	7.04
Этилциклопентан	3.132	3.05
1,2,4-Триметилциклопентан	3.157	2.60
1,2,3-Триметилциклопентан	3.213	1.45
Этил-2-фенилбутаноат	3.35	8.75
1,4-Диметилциклогексан	3.482	9.87
1,1-Диметилциклогексан	3.544	4.96
1,2-Диметилциклогексан	3.632	6.37
1,4-цис-диметилциклогексан	3.681	2.33
1,1,3-Триметилциклогексан	3.942	8.27
1,2,4-Триметилциклогексан	4.041	1.49
п-Ксилол	4.181	2.36
Дибутилциклопентан-1,2-дикарбоксилат	4.287	2.14
3,3-Диметилбутилбензол	4.358	1.16
цис-1-Этил-4-метилциклогексан	4.463	1.57
Циклогексанепропанол	4.573	0.76
2-Метилпропилциклогексан	4.637	1.05
1-Метил-2-пропилциклопентан	4.855	0.58

Повышение температуры процесса на 50 °С вызвало значительное увеличение конверсии исследуемого сырья до 64%. При данных условиях наблюдается резкое также увеличение выхода газообразных продуктов до 47.54% мас., а также изменяется качественный состав и соотношение газообразных продуктов. Суммарное образование C₂–C₃ нециклических олефинов растет, по сравнению с их выходами при 400 °С от 13.6 до 23.6 % мас.,

соответственно. Следует отметить также очевидное увеличение оли реакций изомеризации, что приводит в изменению соотношения выходов бутана и 2-метилпропана при температурах 400 и 450 °С. Если при 400 °С наблюдается лишь образование бутана нормального строения, то при повышении температуры процесса на 50 °С образуется и ее изомер в количестве 10.87% мас. Это связано с тем, что применяемый катализатор NaFeCl₄ является кислотой Бренстеда, обладающей изомеризационной активностью в электрофильных процессах. Вследствие этого при повышении температуры доля изомерных продуктов возрастает за счет увеличения электрофильную активность и избирательность действия катализатора.

Выход жидкой фракции при данной температуре снижается до 52.49% мас., причем ее состав существенно обогащается циклическими структурами изомерного строения состава C₆–C₇. Коксообразование не превышает 0.05% мас.

Дальнейшее повышение температуры в барботажном слое катализатора в значительной мере увеличивает газообразование с одновременным снижением жидких компонентов в составе продуктов. Результаты хроматографического анализа газовой и жидкой фракций продуктов термокаталитической деструкции бензина термического крекинга при 500 °С приведены в табл. 4.

Таблица 4
Состав газовой и жидкой фазы термокаталитического крекинга бензина термического крекинга при 500 °С

Компонент	Время мин	Выход, % мас.
Газообразные продукты		
Водород	1.522	0.23
Метан	3.354	15.63
Этан	3.897	12.35
Этилен	4.576	19.69
Пропан	6.531	7.92
Пропилен	6.592	11.04
Циклобутен	8.806	1.58
Бутан	10.889	9.09
транс-Бутен-2	11.024	3.10
цис-Бутен-2	11.066	2.15
транс-Бутен-1	11.079	2.92
цис-Бутен-1	11.092	1.74
Циклобутан	11.488	2.84
2-Метилпропан	11.144	4.74
2,2-Диметилпропан	14.463	4.98
Жидкая фракция		
2-Гидропероксигептан	2.019	15.92
2,3-Диметилбутан	2.065	28.89
Циклогексан	2.643	18.15
1,4-Дициклогексилбутан	2.966	10.23
2-Метилпропилциклогексан	3.26	4.66
1-Метокси-2-пропанол	3.807	2.62
транс-1,3-Диэтилциклопентан	4.457	3.19
1-Этил-4-изопропилциклогексан	4.593	2.27

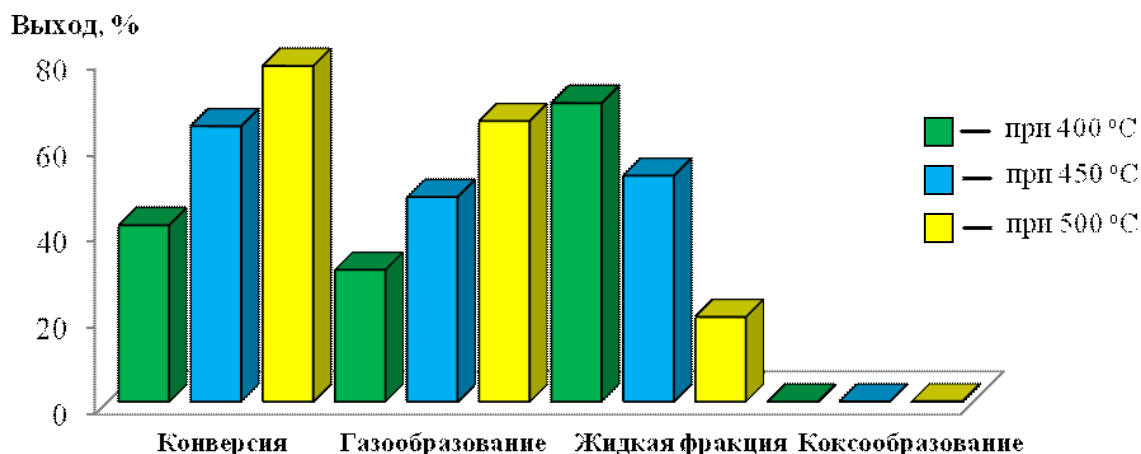


Рис. 1. Зависимость выхода газовой, жидкой фракции и коксообразования от температуры в процессе каталитической деструкции бензина термического крекинга в расплаве катализатора NaFeCl_4

Суммарная конверсия сырья при температуре 500 °C составляет 78%, т.е. не дает существенного прироста по сравнению с температурой на 50 °C ниже, таким образом, дальнейшее увеличение температуры в реакционной зоне не представляется продуктивным. Баланс газо- и жидкофазных продуктов показывает, что заметно увеличивается образование газов – 65.19% мас. Следует отметить, что при данных условиях процесс особенно эффективен по выходу низших олефинов и их выходы, соответственно, составляют: этилен – 19.69% мас., пропилен – 11.04% мас., C_4H_8 – 8.91% мас.

Образование жидкой фракции не превышает 34.71% мас., при этом компонентный состав жидкой фракции в основном представлен разветвленными алифатическими и циклическими продук-

тами состава C_6 , и их суммарное содержание достигает 47.04% мас. Коксообразование составило при данных условиях 0.1% мас.

Суммарные балансовые характеристики процессов термокаталитической конверсии бензина термического крекинга в расплаве тетрахлорферрата во всем выбранном температурном диапазоне приведен на диаграмме (рис. 1).

Таким образом, проведенные исследования показали возможность применения тетрахлорферрата натрия в качестве активного катализатора переработки сырья вторичного происхождения, и была показана возможность эффективного получения ценных легких углеводородов от низших газообразных олефинов до легких жидких углеводородных фракций.

Литература

1. Доронин В.П., Липин П.В., Потапенко О.В., Сорокина Т.П., Короткова Н.В., Горденко В.И. Перспективные разработки: катализаторы крекинга и добавки к ним // Катализ в промышленности. – 2014. – №5. – С.82-87.
2. Неведов Б.К., Радченко Е.Д., Алиев Р.Р. Катализаторы процессов углубленной переработки нефти. – М.: Химия, 1992. – 265 с.
3. Sahu R.A., Song B.J., Im J.S., Jeon Y.P., Lee C.W. Review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2015. – V.27. – Pp.12-24.
4. Сахибгареев С.Р., Цадкин М.А., Бадилова А.Д., Бикбулатов Ш.Н., Матюшкин С.Н., Новикова В.Д. Каталитическое расщепление мазута на модифицированном металлхлоридном катализаторе // Баш. хим. ж. – 2022. – Т.29, №3. – С.78-83.
5. Lappas A.A., Iatridis D.K., Papapetrou M.C., Kopalidou E.P., Vasalos I.A. Feedstock and catalyst effects in fluid catalytic cracking – Comparative yields in bench scale and pilot plant reactors // Chemical Engineering Journal. – 2015. – V.278. – Pp.140-149.

References

1. Doronin V.P., Lipin P.V., Potapenko O.V., Sorokina T.P., Korotkova N.V., Gordenko V.I. *Perspektivnye razrabotki: katalizatory krekinga i dobavki k nim* [Promising developments: cracking catalysts and additives to them]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry], 2014, no.5, pp.82-87.
2. Nefedov B.K., Radchenko E.D., Aliev R.R. *Katalizatory protsessov uglublennoy pererabotki nefi* [Catalysts of processes of advanced oil refining]. Moscow, Khimiya, 1992, 265 p.
3. Sahu R.A., Song B.J., Im J.S., Jeon Y.P., Lee C.W. [Review of recent advances in catalytic hydrocracking of heavy residues]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, vol.27, pp.12-24.
4. Sakhibgareev S.R., Tsadkin M.A., Badikova A.D., Bikbulatov Sh.N., Matyushkin S.N., Novikova V.D. *Kataliticheskoe rasshchepenie mazuta na modifitsirovannom metallkhlordnom katalizatore* [Catalytic cleavage of fuel oil on a modified metal chloride catalyst]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2022, vol.29, no.3, pp.78-83.

6. Tsadkin M.A., Sakhibgareev S.R., Gumerova E.F., Badikova A.D. New type jet turbulent contactor for sulfuric acid alkylation of isobutane with olefins // *New Journal of Chemistry*.– 2022.– V.46, №46.– Pp.22322-22331.
7. Ershov D.S., Khafizov A.R., Mustafin I.A., Stankevich K.E., Gantsev A.V., Sidorov G.M. Current state and development trends of the catalytic cracking process. *Fundamental research*.– 2017.– №.12.– Pp.282-285.
8. Конторович А.Э., Эдер Л.В. Новая парадигма стратегии развития сырьевой базы нефтедобывающей промышленности российской федерации // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*.– 2015.– №5.– С.8-17.
9. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа.– Уфа: Гилем, 2002.– 627 с.
10. Kondrasheva N. K., Vasil'ev V.V., Boitsova A.A. Study of Feasibility of Producing High-Quality Petroleum Coke from Heavy Yarega // *Oil Chemistry and Technology of Fuels and Oils*.– 2017.– №6.– Pp.663-669.
11. Kim J.-S. Pyrolysis of plastic waste using the non-catalytic hamburger process and a catalytic process using the cyclized-spheres-reactor // *Environmental Engineering Research*.– 2014.– V.9, №1.– Pp.31-37.
12. Ebrahimi A.A., Tarighi S., Ani A.B. Experimental and Kinetic Study of Catalytic Cracking of Heavy Fuel Oil Over E-CAT/MCM-41 // *Catalyst. Kinetics and Catalysis*.– 2016.– V.57.– Pp.610-616.
13. Сахибгареев С.Р., Бадикова А.Д., Цадкин М.А., Осипенко Е.В., Бурханова В.В., Абдрахманов Б.А., Гумерова Э.Ф. Каталитическая переработка диенового углеводорода в среде расплавленного катализатора // *Баш. хим. ж.*– 2021.– Т.28, №3.– С.65-69.
14. Сахибгареев С.Р., Цадкин М.А., Бадикова А.Д., Казанцева Д.И., Арсланова Я.М., Давудов М.Э. Каталитический крекинг тяжелого вакуумного газойля на хлорферратном катализаторе // *Вестник Башкирского университета*.– 2022.– Т.27, №4.– С.981-986.
15. Сахибгареев С.Р., Бадикова А.Д., Цадкин М.А., Султанова М.Р., Магсумова Л.Ф. Термокаталитическая деструкция мазута в присутствии хлорферратного катализатора // *Баш. хим. ж.*– 2023.– Т.30, №3.– С.58-63.
5. Lappas A. A., Iatridis D. K., Papapetrou M. C., Kopalidou E. P., Vasalos I. A. [Feedstock and catalyst effects in fluid catalytic cracking – Comparative yields in bench scale and pilot plant reactors]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol.278, pp.140-149.
6. Tsadkin M.A., Sakhibgareev S.R., Gumerova E.F., Badikova A.D. [New type jet turbulent contactor for sulfuric acid alkylation of isobutane with olefins]. *New Journal of Chemistry*, 2022, vol.46, no.46 pp.22322-22331.
7. Ershov D.S., Khafizov A.R., Mustafin I.A., Stankevich K.E., Gantsev A.V., Sidorov G.M. [Current state and development trends of the catalytic cracking process]. *Fundamental research*, 2017, no.12, pp.282-285.
8. Kontorovich A.E., Eder L.V. *Novaya paradigma strategii razvitiya syr'evoy bazy nefte dobyvayushchey promyshlennosti rossiiskoi federatsii* [New paradigm of the strategy for the development of raw material base of the oil industry of the Russian Federation]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie* [Mineral Resources of Russia. Economics and Management], 2015, no.5, pp.8-17.
9. Akhmetov S.A. *Tekhnologiya glubokoy pererabotki nefti i gaza* [Technology of deep processing of oil and gas] Ufa, Gilem, 2002, 627 p.
10. Kondrasheva N. K., Vasil'ev V.V., Boitsova A.A. [Study of Feasibility of Producing High-Quality Petroleum Coke from Heavy Yarega]. *Oil Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2017, no.6, pp.663-669.
11. Kim J.-S. [Pyrolysis of plastic waste using the non-catalytic hamburger process and a catalytic process using the cyclized-spheres-reactor]. *Environmental Engineering Research*, 2014, vol.9, no.1, pp.31-37.
12. Ebrahimi A.A., Tarighi S., Ani A.B. [Experimental and Kinetic Study of Catalytic Cracking of Heavy Fuel Oil Over E-CAT/MCM-41]. *Catalyst. Kinetics and Catalysis*, 2016, vol.57, pp.610-616.
13. Sakhibgareev S.R., Badikova A.D., Tsadkin M.A., Osipenko E.V., Burkhanova V.V., Abdrakhmanov B.A., Gumerova E.F. *Kataliticheskaya pererabotka dienovogo uglevodoroda v srede rasplavlennogo katalizatora* [Catalytic processing of diene hydrocarbon in the medium of molten catalyst]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], , 2021, vol.28, no.3, pp.65-69.
14. Sakhibgareev S.R., Tsadkin M.A., Badikova A.D., Kazantseva D.I., Arslanova Ia.M., Davudov M.E. *Kataliticheskii kreking tiazhelogo vakuumnogo gazoilia na khlorferratnom katalizatore* [Catalytic cracking of heavy vacuum gas oil on chloroferrate catalyst]. *Vestnik Bashkirskogo universiteta* [Bulletin of Bashkir University], 2022, vol.27, no.4, pp.981-986.
15. Sakhibgareev S.R., Badikova A.D., Tsadkin M.A., Sultanova M.R., Magsumova L.F. *Termokataliticheskaya destrukttsiya mazuta v prisutstvii khlorferratnogo katalizatora* [Thermocatalytic destruction of fuel oil in the presence of chloroferrate catalyst]. *Bashkirskii khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2023, vol.30, no.3, pp.58-63.