Т. А. Муниров (асп.), А. Р. Давлетшин (к.т.н., доц.), А. Ф. Ахметов (д.т.н., проф., зав. каф.),
Р. Р. Шириязданов (к.т.н., доц.), Ю. А. Хамзин (асп.), А. В. Ганцев (к.т.н., доц.),
Д. М. Амангельдиев (магистрант)

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОСТИ НЕПЛАТИНОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ В РЕАКЦИЯХ АРОМАТИЗАЦИИ СЫРЬЯ РИФОРМИНГА

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
кафедра технологии нефти и газа
450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1, e-mail: tmunirov@gmail.com

T. A. Munirov, A. R. Davletshin, A. F. Akhmetov, R. R. Shiryazdanov,
Yu. A. Khamzin, A. V. Gantsev, D. M. Amangel'diev

RESEARCH OF THE ACTIVITY OF PLATINUM-FREE CATALYSTS IN THE REACTIONS OF AROMATIZATION OF RAW MATERIAL RIFORMING

Ufa State Petroleum Technological University
1, Kosmonavtov Str., 450062, Ufa, Russia, e-mail: tmunirov@gmail.com

Изучен процесс дегидрирования прямогонного гидроочищенного бензина в интервале температур от 350 до 450 °С, осуществляемый без предварительной подачи водородосодержащего газа. В качестве объектов исследования использованы катализаторы, содержащие платину, никель, кобальт и хром. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения неплатиновых катализаторов на одной из ступеней процесса риформинга при более мягких режимных условиях, без ущерба для селективности процесса дегидрирования.

Ключевые слова: ароматические углеводороды; бензин; катализатор; каталитический риформинг; платиновый катализатор; цеолитсодержащий катализатор.

The process of dehydrogenation of straight-run hydrotreated gasoline was studied in the temperature range from 300 to 450 °C, without preliminary supply of hydrogen-containing gas. The catalysts containing platinum, nickel, cobalt and chromium were used as the objects of research. Based on the results of the work, conclusions were drawn on the prospects of using non-platinum catalysts at one of the stages of the reforming process.

Ключевые слова: ароматические углеводороды; бензин; катализатор; каталитический риформинг; платиновый катализатор; цеолитсодержащий катализатор.

Производство современных автомобильных бензинов основано на продуктах таких процессов, как каталитический крекинг, каталитический риформинг, алкилирование и изомеризация. При этом в России в качестве основного компонента высокооктановых топлив до сих пор используется риформат (рис. 1) ^{1,2}.

Совершенствование на протяжении более 50 лет технологии каталитического риформинга позволило существенно увеличить выход целевых продуктов и продолжительность межрегенерационных пробегов катализатора ³. Однако в связи с увеличением потребления товарного автобензина и ужесточением экологических требований, предъявляемых к топливу,

вопрос о совершенствовании технологии процесса по-прежнему остается актуальным.

Рис. 1. Компонентный состав товарных автобензинов

Дата поступления 14.01.18

Как правило, процесс каталитического риформинга осуществляется в каскаде из 3–4 реакторов в интервале температур 470–530 °С, при давлении 10–30 атм, объемной скорости 1–2 ч⁻¹. Помимо основного продукта – риформата, на установках риформинга вырабатывается водородосодержащий газ (ВСГ), часть которого возвращается в реакторный контур для поддержания давления и снижения скорости коксообразования на катализаторе ^{1,2}.

Большинство установок риформинга в РФ были построены в середине 70-х годов прошлого века ⁴. Ввиду длительного срока их службы, реконструкция и модернизация реакторов и аппаратов требует крупных капиталовложений, таким образом, более экономичное усовершенствование ныне действующих установок возможно за счет оптимизации технологической схемы и внедрения новых катализаторов.

В работах ^{5–7} предложены схемы комбинирования установок каталитического риформинга с установками гидрокрекинга, изомеризации и ректификации платформата. Подобные перестроения и дополнения действующих технологических блоков позволяют увеличить выработку товарных автобензинов, соответствующих экологическим требованиям без существенных капиталовложений.

Авторами ⁸ проведено сравнение показателей работы российских и зарубежных катализаторов риформинга на отечественных НПЗ. Для более объективного исследования установки были поделены на несколько групп по условиям эксплуатации. Результаты анализа показали, что отечественные катализаторы не уступают зарубежным, а по некоторым показателям даже превосходят их.

Несмотря на разнообразие выбора, катализаторы риформинга различных лицензиаров весьма схожи, поскольку в качестве основного компонента, катализирующего реакции риформинга, используется платина. Как правило, при производстве катализаторов риформинга в качестве носителя используют γ-окись алюминия, на которой диспергированы платина, а также промотеры – рений, олово, иридий, палладий. Платина обладает сильной металлической функцией, которая способствует увеличению скорости реакций дегидрирования ¹, однако высокая стоимость платиносодержащих катализаторов и строгие требования к сырью риформинга по содержанию серы, воды и азота способствуют поиску более дешевых и устойчивых к действию ядов катализаторов.

Известны исследования ⁹ по разработке цеолитсодержащего катализатора риформинга

и анализ показателей его работы при превращении *n*-гексана. Особенностью таких катализаторов стало применение меди в качестве металла, обладающего гидрирующе-дегидрирующей функцией. Была показана возможность ведения процесса как в среде ВСГ, так и в безводородном варианте, подобраны оптимальные температурные условия применения катализатора, а также выявлены его преимущества перед алюмоплатиновыми катализаторами.

Перспективы использования катализаторов, не содержащих платину, были освещены в работах ^{10, 11}. Авторами проведены исследования риформинга бензинов на механической смеси Al-Co-Mo-O катализатора и высококремнеземного цеолита ЦВК-Н. В качестве сырья использован прямогонный гидроочищенный бензин фр. 85–180 °С.

Одним из перспективных направлений в области оптимизации работы установки каталитического риформинга является модернизация внутреннего устройства аппаратов. Традиционная схема движения газосырьевых потоков в реакторе – от периферии к центру – обладает рядом таких недостатков, как неравномерность отложения кокса, из чего следует неравномерность распределения концентраций и температур по ширине слоя реактора, снижение объемной скорости и селективности целевых реакций. Исследователями ¹² предложено изменить направление движения газосырьевого потока в реакторе. Разработанная математическая модель показала преимущества, которые можно будет достичь при использовании схемы движения от центра к периферии, среди которых повышение октанового числа, увеличение длительности межрегенерационного пробега катализатора, увеличение производительности.

Подобное изменение конструкции реактора было осуществлено на действующей установке ¹³. Разработанная система ввода сырья от центра к периферии позволила уменьшить застойные зоны, увеличить селективность и обеспечить прохождение потока по полному объему катализатора.

Исследование и применение математических моделей позволяет эффективно осуществлять комплексный мониторинг процесса. На основе многолетнего сбора информации о технологических показателях действующей установки каталитического риформинга была создана компьютерная моделирующая система с высокой степенью сходимости, позволяющая оперативно реагировать на изменения состава сырья, степени активности катализатора и ис-

ходя из условий, подбирать оптимальные параметры технологического процесса на протяжении цикла работы катализатора ^{14–19}.

На установках риформинга распределение объема катализатора по ступеням составляет 1:2:4 (1:3:7), а показателем эффективности работы каждой ступени служит перепад температур между входом и выходом из реактора.

В каждом из реакторов установок каталитического риформинга протекают преимущественно реакции определенного типа ^{1,2}. Так, в первом реакторе — реакции дегидрирования нафтен, во втором и третьем возрастает степень реакций дегидроциклизации и изомеризации нормальных парафинов, в четвертом — реакции гидрокрекинга. С целью повышения эффективности всех этапов процесса, для каждого из реакторов должны быть подобраны соответствующие условия — температура, катализатор.

Реакции дегидрирования нафтен в первом реакторе протекают с высокой скоростью, несмотря на минимальную по сравнению с другими реакторами загрузку по катализатору. Относительная «легкость» протекания вышеуказанных реакций позволяет сделать предположение о возможности применения дегидрирующих катализаторов, не содержащих платину, с реализацией процесса в более мягких режимных условиях процесса и в отсутствие водорода.

В настоящей работе исследован процесс дегидрирования, характерный для первой ступени каталитического риформинга, проведен скрининг ряда катализаторов. Отсутствие избыточного водорода позволило оценить стабильность их работы и активировать целевые реакции дегидрирования нафтен.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования был выбран ряд промышленно производимых катализаторов, характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики используемых катализаторов

Образец	Массовая доля компонентов катализатора
Катализатор 1	20–30 % MoO ₃ + 1–5 % NiO / Al ₂ O ₃
Катализатор 2	25% MoO ₃ + 4% CoO / Al ₂ O ₃
Катализатор 3	3% CrO ₃ / Al ₂ O ₃
Катализатор 4	0.6% Pt / Al ₂ O ₃
Катализатор 5	25–38 % Al ₂ O ₃ / 60–72 % SiO ₂
Катализатор 6	0.35% Pt + 0.35% Sn / Al ₂ O ₃

Преимущества упомянутых выше катализаторов заключаются в устойчивости к воздействию катализаторных ядов, возможности применения при пониженных давлениях и температуре.

Процесс дегидрирования проводили на проточно-циркуляционной пилотной установке с реактором объемом 10 см³, заполненным катализатором. Параметры процесса: давление 10 атм, объемная скорость подачи сырья 1 ч⁻¹, температура от 350 до 450 °С. В качестве сырья использован гидроочищенный прямой бензин фр. 105–180 °С.

Результаты и их обсуждение

Как было установлено, наибольший прирост выхода ароматических углеводородов при 350 °С обеспечивал катализатор **2**, имеющий в своем составе молибден и кобальт (содержание аренов возросло на 14% об.) (рис. 2). Выход ароматических углеводородов в продукте, полученном на катализаторе **5**, меньше чем на катализаторе **2** (содержание аренов возросло на 8.4% об.). Стоит отметить, что в полученной смеси практически не изменилось содержание циклоалканов (на 0.6% об. меньше, чем в сырье) и значительно снизилось содержание *n*-алканов (на 1.4% об.). Это позволяет сделать вывод о том, что на катализаторе **5** в основном протекают реакции дегидроциклизации алканов. Из-за низкой активности образцов катализаторов **3**, **4**, **6** проведение исследований при температуре 350 °С было нецелесообразным.

При температуре 400 °С (рис. 3) наибольшее увеличение содержания ароматических углеводородов в продуктовой смеси также обеспечил катализатор **2**. Помимо роста содержания аренов, наблюдалось увеличение содержания изоалканов, что говорит о возрастании скорости протекания реакций изомеризации. Катализатор **3** позволил увеличить содержание ароматических углеводородов на 10% об. Однако в этом случае наблюдалось образование непредельных углеводородов (содержание алкенов возросло на 4.1% об.), связанное с протеканием либо реакций дегидрирования алканов, либо их крекинга.

При увеличении температуры реакции до 450 °С (рис. 4) наблюдалось снижение активности катализатора **2** (содержание аренов в смеси продуктов возросло всего на 4.6% об.). Стабильно проявил себя катализатор **3** — содержание ароматических углеводородов, как и при 400 °С, увеличилось примерно на 10% об. Относительно высокое содержание аренов в

Рис. 2. Углеводородный состав продуктов, полученных при температуре 350 °С, P=10 атм, $v=1 \text{ ч}^{-1}$

Рис. 3. Углеводородный состав продуктов, полученных при температуре 400 °С, P=10 атм, $v=1 \text{ ч}^{-1}$

продуктах, полученных на катализаторах 4 и 6 (15,3 и 13,5 % об. соответственно), вполне закономерно, так как процесс проводили в условиях, близких к рабочему диапазону температур платиносодержащих катализаторов. Образование олефиновых углеводородов в продуктах, полученных на катализаторе 4 (3,2% об. при $t = 400 \text{ °C}$ и $t = 450 \text{ °C}$), связано с наличием коксогенных структур на поверхности и порах катализатора. Как правило, наличие непредельных углеводородов в продукте указывает на частичную дезактивацию катализатора. Образование таких углеводородов на других катализаторах происходило после более длительного периода работы. По-видимому, это связано с тем, что платиносодержащие катализаторы менее устойчивы к реакциям коксообразования в ходе процесса без подачи ВСТГ. Однако более конструктивные выводы можно будет сделать

только после проведения термогравиметрического анализа отработанных образцов катализаторов.

Таким образом, результаты исследования показали возможность использования неплатиновых катализаторов при более мягких режимных условиях без ущерба для селективности процесса дегидрирования, характерного для каталитического риформинга.

Проведенный скрининг ряда катализаторов в отсутствие избыточного водорода позволил оценить стабильность их работы и активировать целевые реакции дегидрирования нафтенных.

Увеличение содержания высокооктановых соединений в полученных продуктах позволяет говорить о перспективе применения исследуемых образцов в качестве катализаторов предварительной ароматизации сырья.

Рис. 4. Углеводородный состав продуктов, полученных при температуре 450 °С, P = 10 атм, $v = 1 \text{ ч}^{-1}$

Литература

1. Ахметов С. А. Технология глубокой переработки нефти и газа.— СПб.: Недра, 2013.— 544 с.
2. Шарова Е.С., Фалеев С.А., Иванчина Э.Д., Гынгазова М.С., Полубоярцев Д.С., Кравцов А.В. Динамика свойств Pt-катализаторов риформинга в процессе промышленной эксплуатации // Катализ в промышленности.— 2013.— №3.— С.48-53.
3. Белый А.С., Смоликов М.Д., Кирьянов Д.И., Проскура А.Г., Удрас И.Е., Дуплякин В.К., Луговской А.И., Логинов С.А., Ващенко П.М. Совершенствование катализаторов риформинга и технологии процесса. Новые разработки института катализа // Катализ в промышленности.— 2003.— №6.— С.3-12.
4. Pierre-Yves Le Goff. Современные катализаторы для риформинга // Нефтегазовые технологии.— 2010.— №3.— С.93-96.
5. Рахматуллин А.Р., Ахметов А.Ф., Нурмухаметова Э.Р. Получение автомобильных бензинов с пониженным содержанием ароматических компонентов // Нефтегазовое дело.— 2014.— №2.— С.106-112.
6. Ясакова Е.А., Ситдикова А.В., Морозов А.Н., Ахметов А.Ф. Разработка вариантов производства высокооктановых бензинов в ОАО «Салаватнефтеоргсинтез» // Технологии нефти и газа.— 2011.— №2.— С.3-10.
7. Мнушкина О.И., Касьянов А.А., Самойлов Н.А. Оптимизация технологической схемы риформинга // Химия и технология топлив и масел.— 2006.— №3.— С.18-22.
8. Крачилов Д.К., Тишкина О.Б., Елшин А.И., Кузора И.Е., Гурдин В.И. Анализ показателей работы российских и зарубежных катализаторов риформинга на отечественных нефтеперерабатывающих заводах // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2012.— №3.— С.3-11.
9. Кузьмина Р.И., Фролов М.П., Ливенцев В.Т., Ветрова Т.К., Ковнев А.В. Разработка цеолитсо-

References

1. Akhmetov S. A. *Tekhnologiya glubokoi pererabotki nefiti i gaza* [Technology of deep oil and gas processing]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2013, 544 p.
2. Sharova E.S., Faleev S.A., Ivanchina E.D., Gyn-gazova M.S., Poluboiartsev D.S., Kravtsov A.V. *Dinamika svoistv Pt-katalizatorov riforminga v protsesse promyshlennoi ekspluatatsii* [Dynamics of properties of Pt-catalysts of reforming during industrial operation]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in industry], 2013, no.3, pp.48-53.
3. Belyi A.S., Smolikov M.D., Kir'ianov D.I., Proskura A.G., Udras I.E., Dupliakin V.K., Lugovskoi A.I., Loginov S.A., Vashchenko P.M. *Sovershenstvovanie katalizatorov riforminga i tekhnologii protsessa. Novye razrabotki instituta kataliza* [Perfection of reforming catalysts and process technology. New developments of the Institute of Catalysis]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in industry], 2003, no. 6, pp. 3-12.
4. Pierre-Yves Le Goff. *Sovremennye katalizatory dlya riforminga* [Modern catalysts for reforming]. *Neftegazovye tekhnologii* [Oil and gas technologies], 2010, no.3, pp.93-96.
5. Rakhmatullin A.R., Akhmetov A.F., Nurmukhametova E.R. *Poluchenie avtomobil'nykh benzinov s ponizhennym soderzhanie aromatischeskikh komponentov* [Obtaining of automotive gasolines with reduced aromatic content]. *Neftegazovoe delo* [Oil and gas business], 2014, no.2, pp.106-112.
6. Yasakova E.A., Sitdikova A.V., Morozov A.N., Akhmetov A.F. *Razrabotka variantov proizvodstva vysokooktanovykh benzinov v OAO «Sala-vatnefteorgsintez»* [Development of options for the production of high-octane gasoline at JSC Salavatnefteorgsintez]. *Tekhnologii nefiti i gaza* [Oil and Gas Technologies], 2011, no.2, pp.3-10.
7. Mnushkina O.I., Kas'yanov A.A., Samoilov N.A. *Optimizatsiya tekhnologicheskoi skhemy*

- державного катализатора риформинга // Катализ в промышленности.— 2010.— №6.— С.29-33.
10. Колесников И.М., Винокуров В.А., Кильянов М.Ю., Колесников С.И., Чеховская О.М. Особенности риформинга бензинов на смешанных цеолит Al—Co—Mo—O катализаторах // Нефть, Газ и Бизнес.— 2010.— №5.— С.79-84.
 11. Могалис М.А., Колесников С.И., Колесников И.М. Активность механической смеси катализаторов для процесса риформинга // Химия и технология топлив и масел.—2006.— №2.— С.40-44.
 12. Костенко А.В., Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Ивашкина Е.Н. Оптимизация внутренних устройств реакторов риформинга с использованием нестационарной кинетической модели // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2007.— №1.— С.18-22.
 13. Муниров А.Ю. Интенсификация процесса риформинга совершенствованием конструкции реактора: Дис. ... канд. техн. наук.— Уфа.: УГНТУ, 1999.— 190 с.
 14. Молотов К.В., Фалеев С.А., Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Шарова Е.С., Дементьев А.Ю. Повышение технико-экономической эффективности работы промышленной установки ЛЧ-35-11/1000 методом математического моделирования // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2009.— №12.— С.3-5.
 15. Костенко А.В., Молотов К.В., Иванчина Э.Д., Кравцов А.В., Фалеев С.А., Абрамин А.Л. Разработка и применение технологических критериев оценки активности и стабильности Pt-катализаторов риформинга бензинов методом математического моделирования // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2007.— №6.— С.18-22.
 16. Костенко А.В., Молотов К.В., Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Ясюкевич О.М. Мониторинг установки ЛЧ-35-11/1000 с использованием компьютерной системы контроля работы катализаторов риформинга // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2007.— №4.— С.13-16.
 17. Иванчина Э.Д., Шарова Е.С., Кокшаров А.Г., Фалеев С.А., Федюшкин А.И. Оптимизация режимов работы катализаторов риформинга с использованием метода математического моделирования // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2014.— №10.— С.25-29.
 18. Кравцов А.В., Хадарцев А.Ч., Шатовкин А.А., Милюшиников А.В., Ивашкина Е.Н., Иванчина Э.Д., Юрьев Е.М. Компьютерное моделирование процесса дегидрирования высших n-парафинов на Pt-катализаторах // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2007.— №5.— С.35-40.
 19. Костенко А.В., Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Полубоярцев Д.С. Оценка технологических параметров Pt-катализаторов риформинга методом математического моделирования // Нефтепереработка и нефтехимия.— 2005.— №12.— С.26-31.
 8. Krachilov D.K., Tishkina O.B., Elshin A.I., Kuzora I.E., Gurdin V.I. *Analiz pokazatelei raboty rossiiskikh i zarubezhnykh katalizatorov riforminga na otechestvennykh neftepererabatyvayushchikh zavodakh* [Analysis of the performance of Russian and foreign catalysts for reforming at domestic refineries]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry], 2012, no.3, pp.3-11.
 9. Kuz'mina R.I., Frolov M.P., Liventsev V.T., Vetrova T.K., Kovnev A.V. *Razrabotka tseolitsoderzhashchego katalizatora riforminga* [Development of a zeolite-containing reforming catalyst]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in industry], 2010, no.6, pp.29-33.
 10. Kolesnikov I.M., Vinokurov V.A., Kil'ianov M.Yu., Kolesnikov S.I., Chekhovskaya O.M. *Osobennosti riforminga benzinov na smeshannykh tseolit Al—Co—Mo—O katalizatorakh* [Peculiarities of gasoline reforming on mixed zeolite Al-Co-Mo-O catalysts]. *Neft', Gaz i Biznes* [Oil, gas and business], 2010, no.5, pp.79-84.
 11. Mogalis M.A., Kolesnikov S.I., Kolesnikov I.M. *Aktivnost' mekhanicheskoi smesi katalizatorov dlia protsessa riforminga* [Activity of a mechanical mixture of catalysts for the reforming process]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel* [Chemistry and technology of fuels and oils], 2006, no.2, pp.40-44.
 12. Kostenko A.V., Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Ivashkina E.N. *Optimizatsiya vnutrennikh ustroystv reaktorov riforminga s ispol'zovaniem nestatsionarnoi kineticheskoi modeli* [Optimization of internal devices of reforming reactors using a non-stationary kinetic model]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry], 2007, no.1, pp.18-22.
 13. Munirov A.Yu. *Intensifikatsiya protsessa riforminga sovershenstvovaniem konstruktssii reaktora. Diss. kand. tekhn. nauk* [Intensification of the reforming process by improving the design of the reactor. Cand. eng. sci. diss.]. Ufa, USPTU Publ., 1999, 190 p.
 14. Molotov K.V., Faleev S.A., Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Sharova E.S., Dement'ev A.Yu. *Povyshenie tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti raboty promyshlennoi ustanovki LCh-35-11/1000 metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Increase of technical and economic efficiency of operation of the industrial plant LP-35-11/1000 by mathematical modeling]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry], 2009, no.12, pp.3-5.
 15. Kostenko A.V., Molotov K.V., Ivanchina E.D., Kravtsov A.V., Faleev S.A., Abramina A.L. *Razrabotka i primenenie tekhnologicheskikh kriteriev otsenki aktivnosti i stabil'nosti Pt-katalizatorov riforminga benzinov metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Development and application of technological criteria for assessing the activity and stability of Pt-catalysts for gasoline reforming by mathematical modeling]. *Neftepererabotka i neftekhimiya*

[Oil refining and petrochemistry], 2007, no.6, pp.18-22.

16. Kostenko A.V., Molotov K.V., Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Iasiukevich O.M. *Monitoring ustanovki LCh-35-11/1000 s ispol'zovaniem komp'yuternoi sistemy kontrolya raboty katalizatorov riforminga* [Monitoring of the LP-35-11/1000 installation using a computerized monitoring system for the operation of reforming catalysts]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry], 2007, no. 4, pp. 13-16.
17. Ivanchina E.D., Sharova E.S., Koksharov A.G., Faleev S.A., Fediushkin A.I. *Optimizatsiya rezhimov raboty katalizatorov riforminga s ispol'zovaniem metoda matematicheskogo modelirovaniya* [Optimization of the modes of operation of the reforming catalysts using the mathematical modeling method]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry], 2014, no.10, pp.25-29.
18. Kravtsov A.V., Khadartsev A.Ch., Shatovkin A.A., Milishnikov A.V., Ivashkina E.N., Ivanchina E.D., Yur'ev E.M. *Komp'yuternoe modelirovanie protsessa degidrirovaniya vysshikh n-parafinov na Pt-katalizatorakh* [Computer modeling of dehydrogenation of higher *n*-paraffins on Pt-catalysts]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry], 2007, no.5, pp.35-40.
19. Kostenko A.V., Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Poluboiartsev D.S. *Otsenka tekhnologicheskikh parametrov Pt-katalizatorov riforminga metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Estimation of technological parameters of Pt-catalysts of reforming by mathematical modeling]. *Neftepererabotka i neftekhimiya* [Oil refining and petrochemistry], 2005, no.12, pp.26-31.