

М. Ю. Антонова, Е. Г. Зайцева, Ю. Х. Усманова, А. Р. Давлетшин,
Н. В. Лыжина, С. М. Петров, Н. Ю. Башкирцева

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ГИДРОКРЕКИНГА ТЯЖЕЛОГО НЕФТЯНОГО ОСТАТКА ПРИ МОДИФИКАЦИИ УГОЛЬНЫХ ДОБАВОК ОКСИДАМИ МЕТАЛЛОВ

Ключевые слова: тяжёлый нефтяной остаток, гидрокрекинг, смолисто-асфальтеновые вещества (САВ), угольная добавка, поровое пространство, гидрирование, жидкие углеводороды.

В работе рассматривается возможность увеличения глубины переработки тяжёлого остаточного нефтяного сырья в процессе суспензионно-фазного гидрокрекинга. Основное внимание уделяется проблемам, связанным с применением активированных и модифицированных угольных добавок. Представлены результаты исследования каталитической активности угольных добавок, импрегнированных металлами никеля и железа. Показано, что использование модифицированной угольной добавки NiO и Fe_2O_3 в процессе гидрокрекинга гудрона позволяет увеличить конверсию асфальтенов с 53 % до 78 % и снизить температуру проведения процесса с 460 °C до 450 °C. В результате наблюдается увеличение выхода светлых топливных фракций с 7 % до 17 %. Характерной особенностью применения модифицированной угольной добавки является повышение содержания насыщенных углеводородов и снижение концентрации ароматических соединений в конечных продуктах, что свидетельствует об увеличении интенсивности протекающих реакций гидрирования образующихся ненасыщенных соединений. В статье рассматривается поточная схема крекинга тяжёлой нефти с применением модифицированных угольных добавок по топливному варианту, включая процесс компаундирования с угольной добавкой и водородом, подогрева сырья в печи, и крекинга в реакторном блоке с последующим разделением полученных продуктов в сепараторах, и направлением газовой фазы на традиционные реактора гидрокрекинга с получением светлых нефтепродуктов. Предлагаемая поточная схема отличается от существующих аналогов наличием блоков модификации угольной добавки и регенерации отработанной добавки. Представлена методологический подход для количественной оценки экономической эффективности модификаций угольной добавки на примере увеличения объёма выпуска более дорогих товарных фракций в процессе гидрокрекинга остаточного нефтяного сырья. Показано, что использование в процессе гидрокрекинга остаточного нефтяного сырья модифицированной угольной добавки приводит к росту средневзвешенной цены полученных продуктов, что приводит к увеличению прибыли на 22 %.

М. Yu. Antonova, E. G. Zaitseva, Yu. Kh. Usmanova, A. R. Davletshin,
N. V. Lyzhina, S. M. Petrov, N. Yu. Bashkirtseva

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE HEAVY OIL SLUDGE HYDROCRACKING PROCESS WHEN MODIFYING COAL ADDITIVES WITH METAL OXIDES

Keywords: heavy petroleum residue, hydrocracking, tar-asphaltene substances (SAV), coal additive, pore space, hydrogenation, liquid hydrocarbons.

The paper considers the possibility of increasing the depth of processing of heavy residual petroleum raw materials in the process of suspension-phase hydrocracking. The main focus is on the problems associated with the use of activated and modified carbon additives. The results of a study of the catalytic activity of coal additives impregnated with nickel and iron metals are presented. It is shown that the use of modified carbon additives NiO and Fe_2O_3 in the process of hydrocracking tar allows to increase the conversion of asphaltenes from 53% to 78% and reduce the temperature of the process from 460 °C to 450 °C. As a result, there is an increase in the yield of light fuel fractions from 7% to 17%. A characteristic feature of the use of a modified carbon additive is an increase in the content of saturated hydrocarbons and a decrease in the concentration of aromatic compounds in the final products, which indicates an increase in the intensity of the hydrogenation reactions of the formed unsaturated compounds. The article discusses a flow-through scheme for cracking heavy oil using modified coal additives according to the fuel option, including the process of compounding with coal additives and hydrogen, heating raw materials in a furnace, and cracking in a reactor unit, followed by separation of the products obtained in separators, and directing the gas phase to traditional hydrocracking reactors to produce light petroleum products. The proposed flow-through scheme differs from existing analogues by the presence of blocks for modifying the carbon additive and regenerating the spent additive. A methodological approach is presented for quantifying the economic efficiency of coal additive modifications using the example of an increase in the output of more expensive commodity fractions during hydrocracking of residual petroleum raw materials. It is shown that the use of modified coal additives in the hydrocracking process of residual petroleum raw materials leads to an increase in the weighted average price of the products obtained, which leads to a 22% increase in profits.

Введение

В современной нефтеперерабатывающей промышленности одним из ключевых направлений является глубокая переработка тяжёлого остаточного сырья с целью получения лёгких фракций, что обусловлено не только необходимостью повышения эффективности использования невозобновляемых

энергоресурсов, но и увеличению маржинальности их переработки. Тяжёлое нефтяное сырьё представляет собой сложную смесь углеводородов, отличительной особенностью которого является высокое содержание смолистых и асфальтеновых компонентов. Одним из наиболее привлекательных процессов глубокой переработки тяжёлого остаточного сырья с получением большого

количества светлых нефтепродуктов является гидрокрекинг [1, 2, 3]. Движущей силой процесса является температура и давление водорода в сочетании с дорогостоящими катализаторами. Благодаря этому удаётся достичь конверсии до 95 % и выше при сохранении максимального выхода светлых топливных фракций. Однако процессы гидрокрекинга остаточного нефтяного сырья сопряжены с рядом проблем, включая высокое содержание серы и металлоорганических комплексных соединений, смолистых и асфальтеновых компонентов (САВ), высокий расход дорогих катализаторов и многостадийность процесса, что приводит к росту себестоимости производства и значительному снижению рентабельности переработки [4, 5]. Перспективным решением проблемы снижения затрат и увеличения эффективности процесса гидрокрекинга остаточного нефтяного сырья является поиск и применение простых и доступных каталитических систем или добавок, имеющих большую удельную поверхность.

Предлагаемые подходы к решению проблемы направлены на разработку экономически эффективных каталитических систем, которые способствуют снижению затрат на процессы глубокой переработки тяжелого остаточного нефтяного сырья с высокой степенью превращения смолистых и асфальтеновых компонентов.

В научной работе [6] изучен процесс суспензионного гидрокрекинга, отличающийся применением дисперсных частиц катализатора с размером менее 0,5 мм. Процесс осуществлялся при температурах в диапазоне от 400 до 500 °С и давлениях от 100 до 270 атм. Авторы выделяют два метода гидрокрекинга: с введением мелких частиц катализатора менее 500 мкм и введением двух добавок, одной с мелкими частицами (менее 500 мкм) и второй с частицами среднего размера от 400 мкм до 2000 мкм, с последующим выведением продуктов реакции из реактора. В работах [7, 8, 9] исследована каталитическая активность дисперсных катализаторов, представляющих собой сульфиды молибдена, никеля, железа и вольфрама, в процессе гидрокрекинга остаточного нефтяного сырья. Установлено, что каталитическая активность возрастает в следующем порядке: Mo, (Mo + Ni), Ni, Fe. В работах [10, 11, 12] продемонстрирована возможность крекинга тяжёлого нефтяного сырья с высокой конверсией в светлые топливные фракции с использованием катализаторов на основе природных алюмосиликатов, синтетических цеолитов, глинистых минералов и переходных металлов. Показано, что эффективность каталитических систем процесса крекинга как правило предопределяется площадью межфазной поверхности, их составом и текстурными характеристиками. Основным ограничением применяемых минеральных соединений является их низкая удельная поверхность, что затрудняет взаимодействие с крупными молекулами асфальто-смолистых компонентов тяжёлого нефтяного сырья. С целью повышения конверсии используют высокую концентрацию катализаторов в реакционной среде

или увеличивают их дисперсность, что способствует увеличению внешней поверхности каталитических систем. Решение этой проблемы также является целью многочисленных экспериментальных исследований, направленных на синтез и изучение каталитической активности наноразмерных частиц в процессах крекинга тяжёлых нефтей [13, 14].

В процессах переработки тяжелого нефтяного сырья проблема извлечения и повторного использования отработанных катализаторов из конечных продуктов решается за счет использования экономически целесообразных и доступных добавок, обладающих высокой каталитической активностью. Такими характеристиками способны соответствовать угольные добавки, прошедшие стадии активации и модификации. Добавки на основе углей, характеризующиеся относительно высокой удельной поверхностью и большой пористостью, активно изучаются как носители для каталитически активных центров, известных в процессах переработки остаточных тяжёлых нефтяных фракций [15-18]. Основным преимуществом использования угольных добавок является возможность целенаправленного регулирования удельной площади поверхности и объёмного распределения крупных пор в процессе их активации. Процесс активации угольных добавок позволяет достигать размеров пор, превышающих размеры ассоциатов молекул асфальтенов и смол, что делает их перспективными для применения в технологиях гидрокрекинга тяжёлых нефтяных фракций. В статьях [19, 20] авторы исследовали влияние угольных добавок разных производителей на переработку тяжелого нефтяного остатка при 470 °С и 20 МПа. Результаты показали, что в тяжелом остаточном сырье более 90 % асфальтенов имеют размер до 100 нм, а высокая степень превращения смолисто-асфальтеновых веществ (САВ) обусловлена размером мезопор 10–100 нм. Также показано, что эффективность угольных добавок в конверсии САВ зависит от их адсорбционных свойств, а общая удельная поверхность оказывает меньшее влияние. Для повышения эффективности процесса гидрокрекинга тяжелого углеводородного сырья с участием угольных добавок в их состав включают такие металлы, такие как никель, кобальт, молибден, хром и серебро [21, 22]. Результаты экспериментальных исследований, представленных авторами работ [23, 24] показывают, что каталитический крекинг тяжелого нефтяного сырья в присутствии оксидов никеля, алюминия и железа приводит к значительной трансформации смолистых и асфальтеновых компонентов в углеводороды светлых дистиллятных фракций.

Целью исследования является анализ влияния угольных добавок, модифицированных оксидами никеля и железа, на степень превращения смолистых и асфальтеновых компонентов, а также на состав и выход продуктов гидрокрекинга тяжелого остаточного нефтяного сырья.

Материалы и методы

В качестве объекта была выбрана угольная добавка компании СУЭК «Красноярск»,

модифицированная оксидами Ni и Fe в соотношении 2,3 : 1 методом соосаждения из водных растворов описанным в работе [25], и отличающиеся высокой площадью поверхности (более 230 м²/г) и значительным объёмом мезопор с размерами от 10 до 100 нм (более 0,08844 см³/г).

В качестве тяжелого нефтяного остатка в экспериментах участвовал остаток от атмосферно-вакуумной перегонки нефти (ТНО), с высокой плотностью, составляющей 1,007 г/см³, и значительным содержанием смолистых и асфальтеновых компонентов, превышающим 30 % масс., используемой в качестве сырья для установки комбинированного суспензионного гидрокрекинга гудрона КГПТО АО «ТАИФ-НК».

Процесс гидрокрекинга тяжелого нефтяного сырья осуществлялся в реакторе периодического типа, оснащённом термопарой, манометром, подключенными к регистрирующей аппаратуре, а также перемешивающим устройством и вентилем точной регулировки. Температурный контроль в реакторе обеспечивался нагревательной рубашкой и охлаждающим змеевиком. Процесс проводили под давлением водорода 17 МПа в интервале температур от 435 до 460 °С, в том числе в присутствии модифицированной угольной добавки в количестве 1,5 % масс на сырьё.

Фракционный состав исходного сырья и жидких продуктов экспериментов определялся с помощью ректификации с установлением истинных температур кипения фракций. Для определения группового состава использовался метод жидкостно-адсорбционной хроматографии (SARA анализ) позволяющего определять содержание асфальтенов, смол, ароматических и насыщенных углеводородов. Исследования проводились в соответствии с методическими рекомендациями стандарта ASTM D4124-09, а также требованиями ГОСТ 32269-2013.

Обсуждение результатов

Результаты исследования влияния модификации угольной добавки NiO/Fe₂O₃ на процесс гидрокрекинга тяжелого остатка (ТНО) от атмосферно-вакуумной перегонки нефти в интервале температур 435-460 °С и давлении 17 МПа представлены в табл. 1 и рис. 1. С уменьшением температуры процесса выход жидких продуктов увеличивается с 83 до 91 масс. %, снижается степень превращения смолисто-асфальтеновых веществ и выход газа и кокса. Введение оксидов металлов Ni и Fe в состав угольной добавки приводит к увеличению выхода светлых топливных фракций в составе жидких продуктов в интервале температур от начала кипения до 350 °С с 59 % до 67 % масс., в том числе насыщенных углеводородов с 16 % до 26 % масс.

Применение модифицированной угольной добавки, содержащего оксиды никеля и железа (NiO/Fe₂O₃), позволяет снизить температуру крекинга с 460 до 450 °С при сохранении высокой конверсии асфальтенов, что приводит к увеличению количества жидких продуктов, повышению степени трансформации смолисто-асфальтеновых компонентов, уменьшению содержания

ароматических соединений и увеличению доли насыщенных углеводородов.

Таблица 1 - Выход и состав продуктов гидрокрекинга гудрона

Table 1 - Yield and composition of tar hydrocracking products

Показатели	Условия эксперимента				
	ТНО	Уг.д., 460 °С	Модифицированная Уг.д.		
		460 °С	450 °С	435 °С	
Выход газов, % масс.	-	6,08	8,49	5,87	4,29
Выход жидких продуктов, % масс., в т.ч.:	100	81,27	83,96	89,18	91,9
- УВ	70,1	67,91	70,87	74,37	67,97
- смолы	19,6	8,56	10,81	12,11	16,73
- асфальтены	10,3	4,79	2,2	2,71	7,26
Фракционный состав, % масс.:					
н.к.-200 °С	-	17,81	20,69	8,77	7,87
н.к.-350 °С	-	59,60	67,50	47,10	41,59
> 350 °С	100	40,40	32,50	52,90	58,41
Выход кокса, % масс.	-	12,66	7,63	4,94	3,75

В технологии гидрокрекинга тяжелого нефтяного сырья глубина превращения смолистых и асфальтеновых компонентов существенно влияет на выход коксообразных продуктов. импрегнирование угольной добавки оксидами Ni и Fe приводит к снижению количества коксообразных веществ в 1,5 раза.

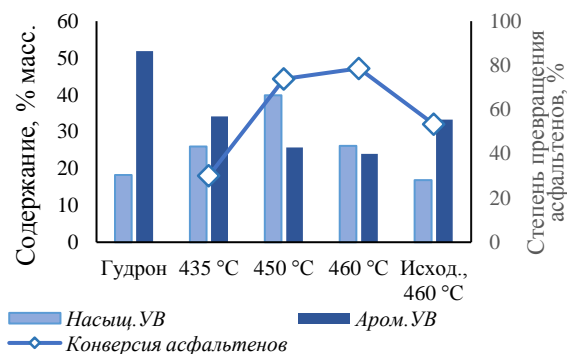


Рис. 1 – Содержание ароматических и насыщенных углеводородов в жидких продуктах крекинга

Fig. 1 – The content of aromatic and saturated hydrocarbons in liquid cracking products

В процессе крекинга на поверхности угольных добавок из продуктов превращения аккумулируются углистые коксообразные вещества. Таким образом, угольные добавки являются эффективными сорбентами, позволяющими удалять из продуктов крекинга тяжелого нефтяного сырья коксообразные вещества, сернистые соединения и металлы.

Схема совмещения процесса гидрокрекинга тяжелых нефтяных остатков с участием модифицированных угольных добавок с вторичными процессами гидрооблагораживания полученных жидких продуктов представлена на рис. 2.

При поступлении на установку тяжёлое нефтяное сырьё подвергается смешиванию с модифицированной угольной добавкой и водородом. Сырьевой поток подвергается нагреву в печи, после чего направляется в реакторный блок, где осуществляются процессы крекинга. В сепарационных устройствах происходит разделение продуктов реакции. Газовая фаза направляется в газофазные реакторы гидрокрекинга, где происходит преобразование в углеводородные газы, нефти, керосина и дизельных фракций, гудрон гидрокрекинга возвращается в начало схемы. Отработанная добавка после горячего сепаратора поступает на блок доочистки в вакуумных испарителях (вакуумный блок), где происходит доотделение высокомолекулярных углеводородов, которые также направляются в газофазные реакторы гидрокрекинга. В существующих схемах, как правило, не предполагается регенерация угольных добавок. Рассматриваются варианты их использования в качестве сырья для производства нефтяного пека, битумных гидроизоляционных материалов, буровых растворов и т.д. Однако использование модифицированных угольных добавок делает возможным их повторное использование после этапов регенерации порового пространства в субкритическом водном флюиде. При регенерации происходит полное восстановление общей площади поверхности, объем пор восстанавливается на 73%, что делает возможным повторное использование добавки.

Экономическая эффективность выбранного варианта переработки оценивается по приросту чистой прибыли от увеличения выхода, либо увеличения цены производимого основного продукта. Так, экономический эффект от процессов, увеличивающих глубину переработки тяжелого нефтяного сырья, рассчитывается по средневзвешенной цене реализуемых топливных фракций и зависит от объема их выпуска (табл. 2).

Применение модифицированной добавки приводит к увеличению объема выпуска более дорогих товарных фракций, что, в свою очередь, повышает экономическую эффективность процесса.

Анализ показывает, что использование модифицированной угольной добавки в процессе крекинга тяжелой нефти способствует росту средневзвешенной цены на 23 %, что, в свою очередь, приводит к увеличению прибыли на 22 %. При затратах на получение модифицированной добавки, которые составляют 36,5 тыс. руб. на тонну сырья, а чистый экономический эффект от использования модифицированной угольной добавки составляет 48,5 тыс. руб./т.

Заключение

Сравнительный анализ эффективности гидрокрекинга тяжелого нефтяного остатка в присутствии угольной добавки компании СУЭК и модифицированного аналога показал, что присутствие в её составе оксидов никеля и железа позволяет увеличить степень превращения асфальтенов при 460 °С с 53 до 78 %. Наличие в составе угольной добавки оксидов NiO и Fe₂O₃ также позволяет усилить реакции крекинга и гидрирования, снизить температуру процесса до 450 °С, увеличить выход жидких продуктов до 87 % и содержание светлых топливных фракций. Отличительной характеристикой является увеличение содержания насыщенных углеводородов и снижение содержания ароматических углеводородов в продуктах, что указывает на протекание реакций гидрирования. Использование модифицированной угольной добавки в процессе крекинга приводит к увеличению средневзвешенной стоимости на 23 %, и увеличению прибыли на 22 %. Учитывая затраты на получение добавки (36,5 тыс. руб. на тонну тяжелой нефти), экономический эффект составит более 40 тыс. руб./т.

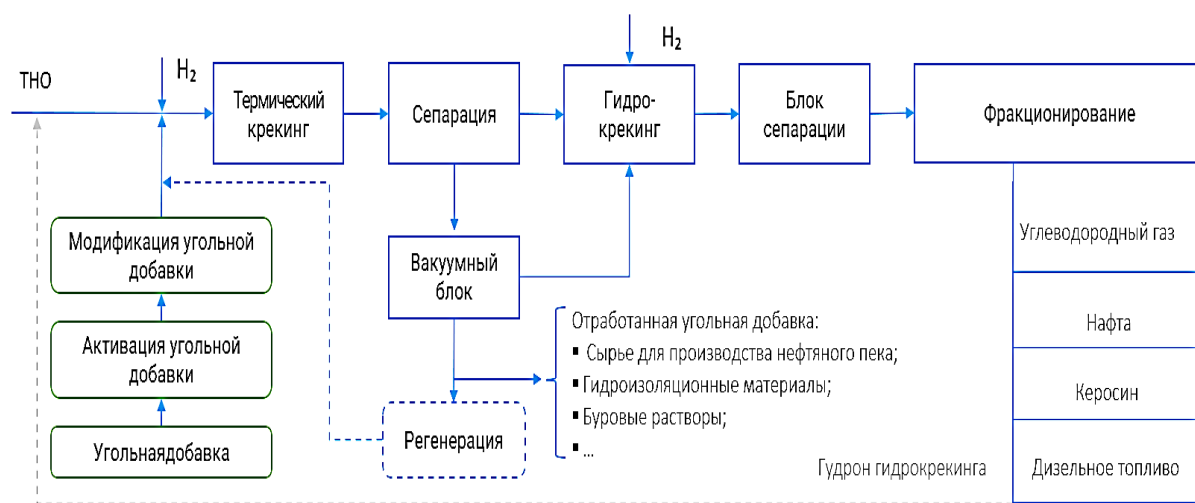


Рис. 2 – Поточная схема гидрокрекинга тяжелого нефтяного остатка с модифицированными угольными добавками

Fig. 2 – Flow-through scheme of hydrocracking of heavy oil residue with modified coal additives

Таблица 2 - Пример оценки экономического эффекта от использования модифицированной угольной добавки оксидами металлов Ni и Fe**Table 2 - Assessment of the economic effect of using a modified carbon additive with metal oxides Ni and Fe**

Наименование продуктов	Средняя цена*, тыс. руб./т	С исходной угольной добавкой		С модифицир. угольной добавкой	
		Выход на 1 т.	Выручка, тыс. руб.	Выход на 1 т.	Выручка, тыс. руб.
Газ углевод.	10,00**	115,2	1152,0	44,6	446,8
Фракция н.к.-к.к., °С:					
н.к - 180 °С	31,83	169,7	5403,4	248,8	7923,7
180 - 220 °С	68,16	152,6	10406,8	223,9	15262,5
220 - 350 °С	44,11	285,2	12585,6	447,9	19760,8
> 350 °С	22,92	262,9	6028,2	14,1	323,7
Итого:		985,8	35576,2	979,5	43717,7
Средневзвешенная цена, тыс. руб./т	36,08 [35576,23 / 0,9858]			44,63 [43717,74 / 0,9795]	
Рост средневзвешен. цены, %, (тыс. руб./т)	23,6 [(44,63/36,08) x 100 – 100], (8,55)				
Прибыль, тыс. руб./т	371,77 [35576,23 x (1 – 0,989)*** x 0,95****]			456,85 [43717,74 x (1 – 0,989)*** x 0,95****]	
Прирост прибыли, %, (тыс. руб./т)	22,8 [(456,85 / 371,77) x 100 – 100], (85,07)				

*средние цены по данным Федеральной службы государственной статистики (Proizvoditeli Cena_12-2024 <https://rosstat.gov.ru/statistics/price>);

** по данным предприятий региона;

***по данным ТАИФ-НК (<https://www.list-org.com/company/234697?ysclid=m7d23aq6m7853871716>): рентабельность (по с/с) = 145 427 000/146 974 000 = 0,989;

****0,95 – коэффициент, отражающий возникновение потерь на последующих стадиях переработки и получения товарных продуктов.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, представленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Литература

- Д.А. Халикова, Вестник Казанского технологического университета 16, 3, 217-221 (2013).
- С.М. Петров, Вестник Казанского технологического университета 17, 18, 209-212 (2014).
- С.М. Петров, Вестник Казанского технологического университета 16, 18, 261-265 (2013).
- Э.А. Галиуллин, Вестник Казанского технологического университета 19, 4, 47-51 (2016)
- Р.Р. Хисмиев, Вестник Казанского технологического университета 17, 21, 312-315 (2014).
- P.J. Becker, Fuel 164, 73-82 (2016).
- А.Л. Максимов, Нефтехимия 59, 5 516-523. (2019).
- И.М. Абдрафикова, Нефтехимия 55, 2, 110-110 (2015).
- А.И. Фатхутдинов, Вестник Казанского технологического университета 20, 7, 74-77 (2017).
- S.M. Petrov, Petroleum Chemistry 56, 1 21-26 (2016).
- А.Г. Окунев, Успехи химии 84, 9 981-999 (2015).
- А.В. Вахин, Процессы 9, 1 158 (2021).
- С.Н. Хаджиев, Нефтехимия 51, 1, 3-16 (2011).
- Б.П. Туманян, Успехи химии 84, 11, 1145-1175 (2015).
- Р.Р. Закиева, Известия Уфимского научного центра РАН 1, 94-99 (2020).
- С.М. Петров, Вестник Казанского технологического университета 19, 17, 60-63 (2016).
- Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 627, 5, 14-19 (2021).
- А. И. Лахова, Химия и технология топлив и масел 58, 2, 297-301 (2022).
- А.К. Шигабутдинов, Нефтепереработка и нефтехимия 5, 3-13 (2022).

- А.К. Шигабутдинов, Вестник Казанского технологического университета 25, 7, 55-59 (2022).
- Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 630, 2, 21-26 (2022).
- Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 635, 1, 25-28 (2023).
- И.Д. Аглиуллина, Вестник Технологического университета 26, 8, 52-57 (2023).
- Е.Г. Зайцева, Химия и технология топлив и масел 643, 3, 15-22 (2024).
- Е.Г. Зайцева, Научный журнал «Российское газовое общество» 44, 2, 106-113 (2024).

References

- D.A. Khalikova, Herald of Kazan Technological University 16, 3, 217-221 (2013).
- S.M. Petrov, Herald of Kazan Technological University 17, 18, 209-212 (2014).
- S.M. Petrov, Herald of Kazan Technological University 16, 18, 261-265 (2013).
- E.A. Galiullin, Herald of Technological University 19, 4, 47-51 (2016)
- R.R. Khismiev, Herald of Kazan Technological University 17, 21, 312-315 (2014).
- P.J. Becker, Fuel 164, 73-82 (2016).
- A.L. Maksimov, Petrochemistry 59, 5 516-523. (2019).
- I.M. Abdrafikova, Petrochemistry 55, 2, 110-110 (2015).
- A.I. Fatkhutdinov, Herald of Technological University 20, 7, 74-77 (2017).
- S.M. Petrov, Petroleum Chemistry 56, 1 21-26 (2016).
- A.G. Okunev, Uspekhi khimii 84, 9 981-999 (2015).
- A.V. Vakhin, Processes 9, 1 158 (2021).
- S.N. Khadzhiev, Petrochemistry 51, 1, 3-16 (2011).
- B.P. Tumanyan, Advances in Chemistry 84, 11, 1145-1175 (2015).
- R.R. Zakieva, Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences 1, 94-99 (2020).
- S.M. Petrov, Herald of Technological University 19, 17, 60-63 (2016).
- E.G. Moiseeva, Chemistry and technology of fuels and oils 627, 5, 14-19 (2021).

18. A. I. Lakhova, Chemistry and technology of fuels and oils 58, 2, 297-301 (2022).
19. A.K. Shigabutdinov, Oil Refining and petrochemistry 5, 3-13 (2022).
20. A.K. Shigabutdinov, Herald of Technological University 25, 7, 55-59 (2022).
21. E.G. Moiseeva, Chemistry and technology of fuels and oils 630, 2, 21-26 (2022).
22. E.G. Moiseeva, Chemistry and technology of fuels and oils 635, 1. 25-28 (2023).
23. I.D. Agliullina, Herald of Technological University 26, 8, 52-57 (2023).
24. E.G. Zaitseva, Chemistry and technology of fuels and oils 643, 3, 15-22 (2024).
25. E.G. Zaitseva, Scientific Journal "Russian Gas Society" 44, 2, 106-113 (2024).

© **М. Ю. Антонова** – студент кафедры Химической технологии переработки нефти и газа (ХТПНГ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия; **Е. Г. Зайцева** – аспирант кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **Ю. Х. Усманова** – к.т.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **А. Р. Давлетшин** – д.т.н., профессор, кафедра технологии нефти и газа, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия; **Н. В. Лыжина** – к.э.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **С. М. Петров** – к.т.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **Н. Ю. Башкирцева** – д.т.н., профессор, кафедра ХТПНГ, КНИТУ.

© **M. Yu. Antonova** – Student of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (CTOGP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia; **E. G. Zaitseva** – PhD-student of the CTOGP department, KNRTU; **Yu. Kh. Usmanova** – PhD (Technical Sci), Associate Professor of the CTOGP department, KNRTU; **A. R. Davletshin** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of Oil and Gas Technology, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia; **N. V. Lyzhina** – PhD (Economical Sci.), Associate Professor of the CTOGP department, KNRTU; **S. M. Petrov** – PhD (Technical Sci), Associate Professor of the CTOGP department, KNRTU; **N. Yu. Bashkirtseva** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, the CTOGP department, KNRTU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 17.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 20.09.25.