

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 544.478.02

DOI 10.55421/3034-4689\_2025\_28\_10\_35

Е. Г. Зайцева, М. Ю. Антонова, Ю. Х. Усманова,  
А. Р. Давлетшин, С. М. Петров

## ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛООКСИДНЫХ УГОЛЬНЫХ ДОБАВОК НА КРЕКИНГ СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ В СУБКРИТИЧЕСКОМ ВОДНОМ ФЛЮИДЕ

*Ключевые слова:* сверхвязкая нефть, низкотемпературный крекинг, угольная добавка, асфальтены, SARA-анализ, степень превращения, металлооксидные катализаторы.

В последнее время прослеживается тенденция увеличения доли сверхвязких нефтей в общем объеме добываемого углеводородного сырья. Недостаточная изученность реакционной способности компонентов сверхвязких нефтей в водных флюидах при высоких температурах и давлениях является основным сдерживающим фактором в создании новых экологически чистых технологий, а также в повышении эффективности существующих процессов их переработки. В статье рассматривается технология низкотемпературного крекинга тяжелого нефтяного сырья с применением угольной металлооксидной добавки. Низкотемпературный крекинг тяжелой нефти проводился при температуре 360 °С и давлении 17 МПа. Основное внимание уделено влиянию угольной добавки на процесс крекинга сверхвязкой нефти, заключающегося в уменьшении выхода жидких углеводородов из-за образования большого количества газов. В статье рассматривается влияние модификации угольных добавок смесью оксидов  $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{NiO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  на процесс превращения асфальтенов и смол в процессе низкотемпературного крекинга сверхвязкой нефти. Показано, что модификация оксидами металлов угольной добавки способствует значительному увеличению степени превращения асфальто-смолистых компонентов и обеспечивает высокий выход насыщенных (более 37 % масс.) и ароматических соединений (более 40 % масс.). Присутствие в составе угольной добавки смеси оксидов  $\text{NiO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  способствует наибольшей конверсии асфальтенов (97 %) и смол (92 %), снижению образования газов и коксообразных веществ, увеличению выхода жидких продуктов с высоким содержанием ароматических углеводородов. Также отмечено присутствие в составе отработанной активированной угольной добавки таких элементов, как сера, железо, никель и ванадий, что свидетельствует о эффективно протекающих процессах десульфуризации и деметаллизации.

Е. G. Zaitseva, M. Yu. Antonova, Yu. H. Usmanova,  
A. R. Davletshin, S. M. Petrov

## EFFECT OF METAL OXIDE COAL ADDITIVES ON CRACKING OF EXTRA-VISCOUS OIL IN SUBCRITICAL AQUEOUS FLUID

*Keywords:* extra-viscous oil, low-temperature cracking, coal additive, asphaltenes, SARA analysis, degree of transformation, metal oxide catalysts.

Recently, there has been a tendency to increase the share of extra-viscous oils in the total volume of produced hydrocarbons. Insufficient knowledge of the reactivity of the components of ultra-viscous oils in aqueous fluids at high temperatures and pressures is the main constraint in the creation of new environmentally friendly technologies, as well as in improving the efficiency of existing processes of their processing. The article examines the effect of a coal metal oxide additive on the low-temperature cracking of heavy oil in a subcritical aqueous fluid. The study was conducted at a temperature of 356 °C and a pressure of 17 MPa. The results of the effect of a coal additive on the cracking process of extra-viscous oil are described, which consists in reducing the yield of liquid hydrocarbons due to the formation of a large amount of gases. The article examines the effect of modification of coal additives by a mixture of  $\text{NiO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{NiO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$  oxides on the conversion of asphaltenes and resins during low-temperature cracking of ultra-viscous oil. It is shown that modification of the coal additive by metal oxides contributes to a significant increase in the degree of conversion of asphalt-resinous components and provides a high yield of saturated (more than 37% by weight) and aromatic compounds (more than 40% by weight). The presence of a mixture of  $\text{NiO}$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oxides in the composition of the coal additive contributes to the greatest conversion of asphaltenes (97%) and resins (92%), a decrease in the formation of gases and coking substances, and an increase in the yield of liquid products with a high content of aromatic hydrocarbons. The presence of elements such as sulfur, iron, nickel and vanadium in the composition of the spent activated carbon additive was also noted, which indicates the effective processes of desulfurization and demetallization.

### Введение

Наличие больших запасов сверхвязких нефтей на планете ставит задачи их эффективного использования в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК). В последнее время наблюдается увеличение доли сверхвязких нефтей в общем балансе добываемого жидкого углеводородного

сырья [1, 2, 3]. Разработка новых и адаптация существующих технологий подготовки и переработки такого сырья становятся особенно важными для обеспечения устойчивого развития ТЭК и повышения эффективности использования природных ресурсов.

От традиционных легких нефтей, сверхвязкие нефти (СВН) отличаются высоким содержанием

тяжёлых смолистых и асфальтовых веществ, сернистых компонентов, практически отсутствием светлых бензиновых и керосиновых фракций, а также высокой плотностью и вязкостью, что значительно затрудняет их транспортировку по существующим нефтепроводам и приводит к росту затрат на вторичных процессах глубокой переработки на НПЗ. Процесс крекинга в среде водного флюида является одним из наиболее перспективных и экологически чистых методов переработки тяжелого нефтяного сырья, отличающийся технологической простотой реализации, способный значительно снизить содержание асфальто-смолистых веществ и сернистых компонентов, увеличивать выход светлых нефтепродуктов [4, 5, 6].

Вязкость водного флюида вблизи критической точки ( $T > 374\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P > 22,1\text{ МПа}$ ) аналогична вязкости газообразному состоянию, что способствует интенсификации процессов массопереноса реагирующих соединений и продуктов реакции. По мере увеличения температуры и давления водного флюида он становится менее плотным из-за теплового расширения. Водородная связь, которая имеет решающее значение для структуры воды, существенно зависит от температуры и давления. Ее длина и прочность уменьшаются с ростом температуры и давления [7]. Физико-химические свойства субкритического водного флюида характеризуются уникальными параметрами, которые существенно отличаются от свойств воды при нормальных условиях либо в состоянии насыщенного или перегретого пара. Константа ионизации молекул воды в субкритической области по сравнению со стандартными условиями увеличивается более чем в 2 раза, что приводит к значительному увеличению в реакционной системе крекинга сверхвязкой нефти концентрации ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  способных участвовать в реакциях как донор и акцептор протонов. Образование активных ионных форм повышает реакционную способность среды. Самонейтрализующийся механизм действия обусловлен одновременным присутствием кислотных ( $\text{H}^+$ ) и основных ( $\text{OH}^-$ ) центров. Принцип работы при крекинге СВН основан на обратимых процессах передачи протонов между катализатором и реагирующими веществами. В ходе реакции протон переходит от катализатора к реагенту, а затем возвращается обратно, восстанавливая исходную форму катализатора. Сверхкритический водный флюид отличается низкой константой диссоциации, диэлектрической проницаемостью, что приводит к свободно-радикальному механизму реакций углеводородных соединений при крекинге СВН. Способность водного флюида вблизи критической точки растворять углеводороды, изменять свои свойства при изменении давления и температуры без разрушения однородности демонстрирует её высокую эффективность как среды для процессов превращения молекул смол и асфальтенов. Одним из перспективных направлений использования субкритического водного флюида является крекинг тяжелых и сверхвязких нефтей [8, 9, 10].

Традиционный крекинг тяжелого нефтяного сырья обычно осуществляется по свободно-радикальному цепному механизму. В присутствии водного флюида до критической или сверхкритической точки воды возможны ионный и радикальный механизмы превращений углеводородов и асфальто-смолистых веществ [11]. Увеличение температуры водного флюида в процессе крекинга тяжелого нефтяного сырья в составе жидких продуктов увеличивается содержание парафиновых, парафинонафтеновых и ароматических соединений преимущественно за счет деструкции смол и полиароматических соединений, с увеличением температуры и давления выше критической точки стремительно растет количество смолисто-асфальтовых веществ, карбено-карбонидов и газов [12]. Ключевым фактором низкотемпературного крекинга сверхвязких нефтей является низкая термическая устойчивость высокомолекулярных сернистых соединений, а именно дисульфидных «мостиковых» связей, тиолов, длинноцепочечных алкилзамещенных гомологов тиофенов и тиофанов, деструкция которых в зависимости от генезиса нефти может инициироваться уже при температурах от 250 до 280-365  $^{\circ}\text{C}$  и сопровождается образованием сероводорода. Увеличение температуры крекинга выше 400  $^{\circ}\text{C}$  и давления более 23 МПа в присутствии водного флюида при соотношении к СВН более 1 к 1 приводит к заметному снижению в жидких продуктах сульфидов и дибензилсульфидов [13]. Кроме сернистых соединений наименьшей термической деструкцией обладают молекулы асфальтенов и смол характеризующиеся большим количеством кислородосодержащих, сульфидных и азотосодержащих «мостиковых» связей способные образовывать крупные надмолекулярные структуры [13]. При температурах крекинга сверхвязкой нефти выше 375  $^{\circ}\text{C}$  при давлении выше 22 МПа водный флюид в процессе крекинга СВН переходит в сверхкритическое состояние, ускоряя радикально-цепные реакции углеводородов [14]. Увеличение времени крекинга сверхвязкой нефти (СВН) свыше 40-60 минут вызывает значительное усиление вторичных реакций, особенно реакций конденсации. В результате этих реакций образуется большое количество коксообразных веществ (кокса) и газов. Образование кокса происходит за счет сложных химических превращений, включающих полимеризацию и конденсацию молекул углеводородов. Газы, в свою очередь, являются побочным продуктом этих реакций и состоят из водорода, метана, этана и других углеводородов [15]. При проведении процесса крекинга сверхвязкой нефти в среде сверхкритического водного флюида в продуктах реакции наблюдается накопление «вторичных» смол и асфальтенов, характеризующихся высокой ароматичностью, конденсированностью и пониженной алифатичностью, что указывает на протекающие реакции поликонденсации [16]. Для достижения оптимальных термобарических условий низкотемпературного крекинга СВН, обеспечивающих минимальное содержание

коксобразных веществ и газообразных продуктов, необходимыми термобарическими условиями являются: интервал температур от 360 до 374 °С и давление не более 22 МПа, при соотношении сверхвязкой нефти к субкритическому водному флюиду, не превышающем 1:1.

Использование в процессе крекинга СВН добавок интенсифицирующих деструкцию асфальто-смолистых веществ позволяет значительно ускорить протекающие реакции и увеличить выход и качество получаемых жидких продуктов. С точки зрения широкой доступности и достаточной изученности в процессах крекинга тяжелого нефтяного сырья такими добавками могут стать оксиды железа, алюминия и никеля. Оксиды железа и алюминия, благодаря своей высокой термостабильности и кислотным свойствам, часто применяются в процессах крекинга высокомолекулярных соединений СВН, способствуя разрыву гетероатом-углеродных и углерод-углеродных связей [17, 18, 19]. Оксид никеля, в свою очередь, обладает восстановительными свойствами, что делает его эффективным в реакциях гидрирования и гидродесульфуризации. Активность оксидов в реакциях крекинга СВН зависят от множества факторов, включая их концентрацию, температуру и давление реакционной среды. В большинстве случаев количество катализаторов не превышает 4 % масс. на сырьё и рассчитывается по количеству содержащихся в нём асфальто-смолистых компонентов. В качестве носителей оксидов металлов используются дешёвые одноразовые сорбенты, такие как глинистые минеральные соединения и угольные добавки, обладающие высокой адсорбционной способностью, химической стабильностью и устойчивостью к термическому воздействию [20].

Целью исследования является изучение влияния угольных добавок, содержащих NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, на процесс низкотемпературного крекинга сверхвязкой нефти в среде субкритического водного флюида.

### Материалы и методы

В качестве основного объекта исследования служили образцы сверхвязкой нефти Ашальчинского месторождения (Татарстан), отличающиеся большим содержанием асфальто-смолистых веществ и сернистых соединений, ввиду интенсивно протекающих в условиях залегания процессов биодегradации, низким содержанием алканов линейного строения (табл. 1).

Таблица 1 - Состав и свойства СВН

Table 1 - Composition and properties of EVO

Показатель	Нефть
Плотность, при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,9762
Вязкость динамическая, мПа·с	2900
Содержание общей серы, % масс.	2,81
САВ, масс. %	24,5
Выход фракций более 350 °С, % масс.	18,1

А также в качестве металлооксидных катализаторов служили угольные добавки (Уг.д.), производимые СУЭК-Красноярск путём глубокой переработки бурого угля и модифицированные методом соосаждения смешанными оксидами NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Уг.д. NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Уг.д. NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (табл. 2).

Таблица 2 - Характеристики металлооксидных катализаторов

Table 2 - Characteristics of metal oxide catalysts

Показатели	NiO/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO/ Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Площадь поверхности по BET, м <sup>2</sup> /г	230	230
Площадь поверхности микропор по t-методу де Бура, м <sup>2</sup> /г	90	101
Площадь поверхности мезо- и макропор по методу ВДН, м <sup>2</sup> /г	51	69
Объем микропор по t-методу де Бура, см <sup>3</sup> /г	0,04	0,04
Объем мезо- и макропор по методу ВДН, см <sup>3</sup> /г	0,18	0,15
Объем пор от 10-100 нм, см <sup>3</sup> /г	0,12	0,09

Крекинг сверхвязкой нефти в субкритическом водном флюиде с металлооксидными угольными добавками проводился на лабораторной установке, оснащенной реактором периодического действия (рис. 1). Реактор объемом 500 мл выполнен из сплава на никелевой основе Hastelloy C-276, оснащен односекционным нагревателем с датчиками температуры. Система дозирования сырья и газов включает плунжерный насос с диапазоном расходов 0,1-10 мл/мин и давлением до 20 МПа, управляемый ПК. Продукты реакции охлаждаются в одноступенчатом холодильнике до 20 °С. Давление в реакторе регулируется обратным клапаном. Эксперименты проводились при высоком давлении и температуре изотермически: нагрев до 360 °С занимал около 20 минут, а выдержка – 20 минут, давление поднималось до 17 МПа. Содержание угольных добавок составляло 1,5 % масс на сверхвязкую нефть. Высокое давление в реакторе достигалось за счет роста температуры, время эксперимента при заданных условиях не превышало 20 мин. далее реактор охлаждался до комнатной температуры.

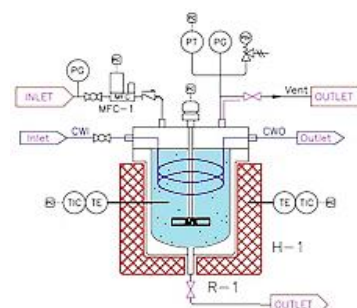


Рис. 1 – Схема реактора лабораторной установки  
Fig. 1 – Schematic diagram of the laboratory reactor

Состав и свойства исходных образцов СВН и жидких продуктов экспериментов изучались с применением комплекса современных аналитических методов исследования. Фракционный

состав СВН и жидких продуктов экспериментов изучался методом ректификации с определением температур выкипания фракций от начала кипения (н.к.) до 350 °С и выше. Групповой состав СВН и жидких продуктов изучался с помощью метода жидкостно-адсорбционной хроматографии на оксиде алюминия в соответствии с ASTM D4124-09 и ГОСТ 32269-2013. Асфальтены осаждали холодным методом Гольде. После фильтрации и отгонки растворителя асфальтены экстрагировали толуолом и определяли их содержание. Разделение мальтенов (насыщенные углеводороды, ароматические соединения, смолы) проводили на хроматографической колонке (20 × 500 мм) с нейтральным оксидом алюминия. Элюирование осуществляли н-гексаном, толуолом и смесью толуол/изопропиловый спирт (3:1), выпаривали фракции и определяли их количественное содержание. Элементный состав определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на приборе ZSX PRIMUS II (Rigaku).

### Обсуждение результатов

При использовании в процессе крекинга сверхвязкой нефти исходной добавки (Уг.д.) наблюдается уменьшение выхода целевых жидких углеводородов, что обусловлено её высокой адсорбционной способностью, полученной в результате её получения при переработке бурого угля компанией СУЭК-Красноярск, что способствует образованию большого количества углистых веществ и газообразных продуктов (рис. 2). Крекинг СВН в присутствии исходной угольной добавки при температуре 360 °С и давлении 17 МПа увеличивает конверсию асфальтенов до 56 % (рис. 3). Включение в состав угольной добавки смеси оксидов NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обеспечивает увеличение конверсии асфальтенов, количество асфальтеновых компонентов в продуктах низкотемпературного крекинга сверхвязкой тяжелой нефти снижается до 0,24 и 0,15 % масс., соответственно (рис. 2).

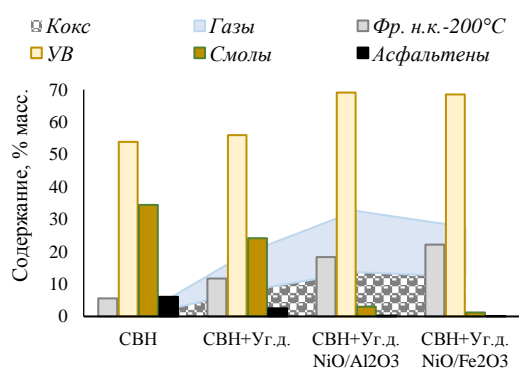


Рис. 2 – Выход продуктов крекинга СВН

Fig. 2 – Yield of EVO cracking products

Процессы деструкции смолисто-асфальтеновых компонентов в присутствии угольных добавок модифицированных NiO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> сопровождаются интенсивно протекающими реакциями присоединения, что приводит к

увеличению углистых веществ (кркса) до 5 % масс., соответственно, доля жидких углеводородов в составе конечных продуктов увеличивается до 90 % масс. (рис. 2).

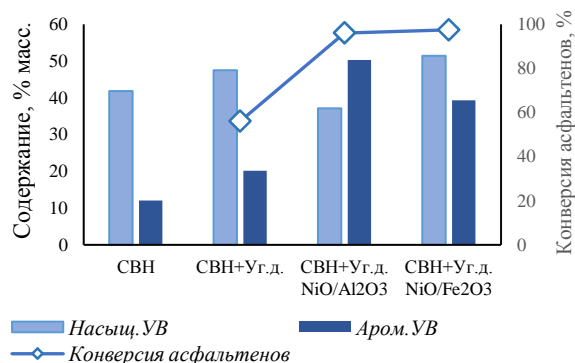


Рис. 3 – Содержание ароматических и насыщенных углеводородов в составе жидких продуктов крекинга СВН

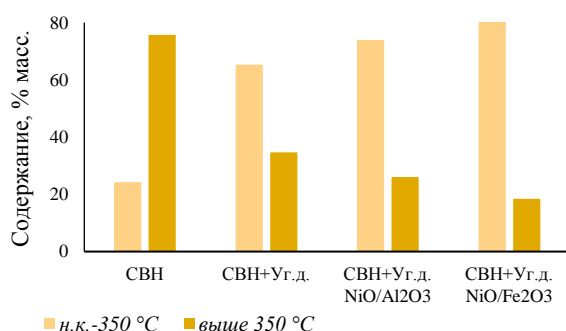
Fig. 3 – The content of aromatic and saturated hydrocarbons in the composition of liquid cracked products EVO

При включении в состав угольной добавки смеси оксидов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и NiO и в составе жидкого продукта наблюдается уменьшение количества аренов до 39 % масс. и увеличение массовой доли алифатических соединений до 52 % масс., а при модификации оксидами Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и NiO увеличивается количество аренов до 50 % масс. (рис. 3), и наибольшее снижение содержания смолистых компонентов до 1,3 % масс (рис. 2). Процесс низкотемпературного крекинга тяжелой нефти с участием угольной добавки, импрегнированной оксидами железа и никеля, также отличается наибольшим процентом превращения смолистых компонентов, более 92 %. Одновременно с этим в составе конечных продуктов происходит снижение газо- и коксообразных соединений, увеличивается доля жидких углеводородов, что указывает на способность оксидов железа, алюминия и никеля избирательно интенсифицировать реакции деструкции асфальто-смолистых компонентов по сульфидным мостиковым связям и отрывом алкильных заместителей с получением углеводородных соединений. При этом степень деструкции асфальтенов увеличивается до 98 %, уменьшается выход газов и коксообразных веществ, в жидких продуктах растет доля светлых топливных фракций (рис. 4).

Модификация угольной добавки оксидами NiO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> также показала высокие результаты. В этом случае был достигнут наибольший выход насыщенных углеводородов (37 % масс.), а выход ароматических углеводородов составил 40 % масс., что свидетельствует о том, что данная модификация способствует увеличению выхода в составе конечных продуктов ароматических соединений, которые находят широкое применение в химической промышленности.

Анализ состава отработанной активированной угольной добавки показал присутствие серы, железа, никеля и ванадия (табл. 3), что указывает на

интенсивно протекающие процессы десульфуризации и деме­таллизации, что является важным аспектом для улучшения качества получаемых продуктов и снижения затрат на их дальнейшую переработку.



**Рис. 4 – Фракционный состав жидких продуктов крекинга СВН**

**Fig. 4 – Fractional composition of liquid cracked products EVO**

**Таблица 3 - Элементный состав угольной добавки до и после крекинга СВН**

**Table 3 - The elemental composition of the carbon additive before and after the cracking of EVO**

Элемент, % отн.	Угольная добавка	
	Исходная	Отработанная
C	97,80	91,60
S	0,72	6,70
Fe	-	0,19
V	-	0,11
Ni	-	0,05

Введение в состав угольных добавок смеси оксидов никеля и алюминия, а также никеля и железа позволяет достичь высокий процент деструкции асфальто-смолистых компонентов и увеличить выход бензиновых, керосиновых и дизельных топливных фракций, снизить образование нежелательных газообразных и коксообразных продуктов. Результаты исследования подтверждают перспективность использования угольной добавки, модифицированной NiO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, для повышения эффективности крекинга сверхвязкой нефти.

### Закключение

Установлено, что низкотемпературный крекинг сверхвязкой тяжелой нефти в среде субкритического водного флюида с участием угольной добавки, содержащей смесь оксидов NiO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, повышает процент деструкции асфальто-смолистых веществ до 90 %, что свидетельствует о высокой эффективности металлооксидных катализаторов на углеродных сорбентах в процессах глубокой переработки тяжелых нефтей. Снижение образования газов и кокса при использовании металлооксидных катализаторов улучшает экономические показатели процесса за счет уменьшения затрат на переработку побочных продуктов.

Дальнейшие исследования в этой области могут привести к разработке более эффективных и

экологически чистых технологий переработки сверхвязких нефтей.

*Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного 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

1. Д.А. Халикова, Вестник Казанского технологического университета 16, 3, 217-221 (2013).
2. С.М. Петров, Вестник Казанского технологического университета 17, 18, 209-212 (2014).
3. С.М. Петров, Вестник Казанского технологического университета 16, 18, 261-265 (2013).
4. Э.А. Галиуллин, Вестник Казанского технологического университета 19, 4, 47-51 (2016).
5. Р.Р. Хисмиев, Вестник Казанского технологического университета 17, 21, 312-315 (2014).
6. P.J. Becker, Fuel 164, 73-82 (2016).
7. А.Л. Максимов, Нефтехимия 59, 5 516-523. (2019).
8. И.М. Абдрафикова, Нефтехимия 55, 2, 110-110 (2015).
9. Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 635, 1. 25-28 (2023).
10. S.M. Petrov, Petroleum Chemistry 56, 1 21-26 (2016).
11. А.Г. Окунев, Успехи химии 84, 9 981-999 (2015).
12. Е.Г. Зайцева, Химия и технология топлив и масел 643, 3, 15-22 (2024).
13. И.Д. Аглиуллина, Вестник Технологического университета 26, 8, 52-57 (2023).
14. Б.П. Туманян, Успехи химии 84, 11, 1145-1175 (2015).
15. Р.Р. Закиева, Известия Уфимского научного центра РАН 1, 94-99 (2020).
16. С.М. Петров, Вестник Казанского технологического университета 19, 17, 60-63 (2016).
17. Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 627, 5, 14-19 (2021).
18. А. И. Лахова, Химия и технология топлив и масел 58, 2, 297-301 (2022).
19. Е.Г. Зайцева, Научный журнал «Российское газовое общество» 44, 2, 106-113 (2024).
20. Е.Г. Моисеева, Химия и технология топлив и масел 630, 2, 21-26 (2022).

### References

1. D.A. Khalikova, Herald of Kazan Technological University 16, 3, 217-221 (2013).
2. S.M. Petrov, Herald of Kazan Technological University 17, 18, 209-212 (2014).
3. S.M. Petrov, Herald of Kazan Technological University 16, 18, 261-265 (2013).
4. E.A. Galiullin, Herald of Technological University 19, 4, 47-51 (2016).
5. R.R. Khismiev, Herald of Kazan Technological University 17, 21, 312-315 (2014).
6. P.J. Becker, Fuel 164, 73-82 (2016).
7. A.L. Maksimov, Petrochemistry 59, 5 516-523. (2019).
8. I.M. Abdrafikova, Petrochemistry 55, 2, 110-110 (2015).
9. E.G. Moiseeva, Chemistry and technology of fuels and oils 635, 1. 25-28 (2023).
10. S.M. Petrov, Petroleum Chemistry 56, 1 21-26 (2016).
11. A.G. Okunev, Uspekhi khimii 84, 9 981-999 (2015).

12. E.G. Zaitseva, Chemistry and technology of fuels and oils 643, 3, 15-22 (2024).
13. I.D. Agliullina, Herald of Technological University 26, 8, 52-57 (2023).
14. B.P. Tumanyan, Advances in Chemistry 84, 11, 1145-1175 (2015).
15. R.R. Zakieva, Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences 1, 94-99 (2020).
16. S.M. Petrov, Herald of Technological University 19, 17, 60-63 (2016).
17. 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. E.G. Zaitseva, Scientific Journal "Russian Gas Society" 44, 2, 106-113 (2024).
20. E.G. Moiseeva, Chemistry and technology of fuels and oils 630, 2, 21-26 (2022).

---

© **Е. Г. Зайцева** – аспирант кафедры Химической технологии переработки нефти и газа (ХТПНГ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия; **М. Ю. Антонова** – студент 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; **С. М. Петров** – к.т.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ, PetrovSM@corp.knrtu.ru.

© **E. G. Zaitseva** – PhD-student of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (CTOGP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia; **M. Yu. Antonova** – 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; **S.M. Petrov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the CTOGP department, KNRTU, PetrovSM@corp.knrtu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 24.09.25.

Дата принятия рукописи в печать – 10.10.25.