

Б. А. Шайхутдинов, М. Ю. Антонова, Л. С. Прокофьева,
Ю. Х. Усманова, Е. Г. Зайцева, С. М. Петров

ОБЛАГОРАЖИВАНИЕ ТЯЖЕЛОЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ В ПРИСУТСТВИИ КАОЛИНА, ОКСИДАНИЯ НИКЕЛЯ И ПОЛИОЛЕФИНОВ

Ключевые слова: тяжелая высоковязкая нефть; облагораживание нефти; смолисто-асфальтеновые вещества; асфальтены; низкотемпературный крекинг; каолинит; оксиды никеля; оксиды алюминия; поли- α -олефины.

Тяжелая нефть содержит значительное количество асфальтенов и смол, что делает её переработку сложной и дорогостоящей. Традиционные методы переработки, такие как термокрекинг и гидроконверсия, имеют низкую эффективность и высокие затраты. В связи с этим разработка новых методов облагораживания тяжелой нефти является актуальной задачей. Эксперименты проводились при температуре 360 °C и давлениях до 12 МПа в атмосфере перегретого водяного пара, в том числе с участием различных добавок, таких как оксид никеля, монокарбоновой кислоты и полимерных отходов, представленных высокомолекулярными полиолефинами. Было обнаружено, что при деструкции компонентов тяжелой нефти на поверхности каолина в продуктах увеличивается доля легкокипящих соединений, при этом снижается содержание насыщенных и ароматических соединений, а также смол и асфальтенов. Добавление монокарбоновой кислоты приводит к увеличению количества спиртобензольных смол и асфальтенов в продуктах крекинга. Однако добавление оксида никеля ведёт к увеличению содержания фракции н.к.-200 °C, что, в свою очередь, приводит к снижению вязкости и улучшает подвижность жидких продуктов облагораживания. Совместный крекинг тяжелой нефти и полиолефинов в присутствии каолина и NiO приводит к существенному увеличению содержания бензольных смол в конечном продукте. Использование NiO и поли- α -олефинов в процессе переработки тяжелой нефти позволяет получить продукты с оптимальными реологическими свойствами и высоким выходом легкокипящих фракций. Применение добавки каолина в процессе облагораживания тяжелой нефти посредством низкотемпературного крекинга в атмосфере перегретого водяного пара представляет собой перспективное направление исследований, которое может привести к разработке более эффективных и экологически чистых методов переработки. Использование технологий облагораживания тяжелого нефтяного сырья в сочетании с поли- α -олефинами позволяет расширить ресурсную базу производства энергоносителей, снизить зависимость от разработки традиционных месторождений углеводородов и обеспечить устойчивое развитие нефтехимической отрасли. Исследования в области облагораживания тяжелого нефтяного сырья с использованием полимерных отходов представляют собой перспективное направление, которое может привести к разработке новых методов переработки нефти и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

**B. A. Shaihutdinov, M. Y. Antonova, L. S. Prokofieva,
Yu. Kh. Usmanova, E. G. Zaitseva, S. M. Petrov**

UPGRADING OF HEAVY HIGH-VISCOSITY OIL IN THE PRESENCE OF KAOLIN, NICKEL OXIDE, AND POLYOLEFINS

Key words: heavy high-viscosity oil; oil upgrading; resinous-asphaltene substances; asphaltenes; low-temperature cracking; kaolinite; nickel oxides; aluminum oxides; poly- α -olefins.

Heavy oil contains significant amounts of asphaltenes and resins, which makes its processing difficult and expensive. Traditional recycling methods such as thermal cracking and hydroconversion have low efficiency and high costs. In this regard, the development of new methods for refining heavy oil is an urgent task. The experiments were carried out at a temperature of 360 °C and pressures up to 12 MPa in an atmosphere of superheated water vapor, including with the participation of various additives such as nickel oxide, monocarboxylic acid and polymer waste represented by high molecular weight polyolefins. It was found that during the degradation of heavy oil components on the surface of kaolin, the proportion of low-boiling compounds in the products increases, while the content of saturated and aromatic compounds, as well as resins and asphaltenes, decreases. The addition of monocarboxylic acid leads to an increase in the amount of alcohol-benzene resins and asphaltenes in cracking products. However, the addition of nickel oxide leads to an increase in the content of the nickel oxide fraction-200 °C, which, in turn, leads to a decrease in viscosity and improves the mobility of liquid refining products. The combined cracking of heavy oil and polyolefins in the presence of kaolin and NiO leads to a significant increase in the content of benzene resins in the final product. The use of NiO and poly- α -olefins in the process of heavy oil refining makes it possible to obtain products with optimal rheological properties and a high yield of low-boiling fractions. The use of kaolin additives in the process of refining heavy oil through low-temperature cracking in an atmosphere of superheated steam is a promising area of research that may lead to the development of more efficient and environmentally friendly processing methods. The use of technologies for refining heavy petroleum raw materials in combination with poly- α -olefins makes it possible to expand the resource base of energy production, reduce dependence on the development of traditional hydrocarbon deposits and ensure the sustainable development of the petrochemical industry. Research in the field of refining heavy petroleum raw materials using polymer waste is a promising area that can lead to the development of new methods of oil refining and reduce the negative impact on the environment.

Введение

В условиях сокращения запасов традиционных месторождений нефти и газа актуальным становится

поиск новых источников углеводородов. Разработка сверхвязких нефтей и природных битумов — перспективное направление, обладающее значительными геологическими запасами [1]. В мире

накоплен большой теоретический и экспериментальный материал, определяющий успешное освоение кондиционных месторождений углеводородных ресурсов, и значительно в меньшей степени решены фундаментальные, научные и технологические задачи, позволяющие эффективно перерабатывать тяжелые высоковязкие нефти [2, 3]. В настоящее время мировые нефтедобывающие и нефтеперерабатывающие компании широко применяют инновационные технологии, обеспечивающие снижение эксплуатационных затрат, увеличение глубины переработки нефтяного сырья и качества получаемых продуктов [4, 5].

Тяжелое нефтяное сырьё представляет собой крайне неоднородный по составу объект, отличающийся высокой концентрацией ароматических и полиароматических соединений, смолисто-асфальтеновых компонентов, большим содержанием металлокомплексных и сернистых веществ, высокими показателями относительной плотности и динамической вязкости. Это создаёт практически сложные проблемы для транспортировки по существующим нефтепроводам и влечёт за собой значительные издержки при переработке в соответствии с существующими технологиями нефтепереработки. Технологии, которые используются в мире для переработки тяжёлых типов нефти, обычно состоят из нескольких этапов. На первом этапе сырьё подвергается атмосферной и вакуумной перегонке. Для переработки природного битума часто применяют технологию сольвентного разделения. В её основе лежит процесс деасфальтизации. Среди деструктивных методов переработки можно выделить висбреинг, каталитический крекинг, гидрокрекинг, акватермолиз, гидропиролиз, замедленное коксование и флексикокинг. На заключительном этапе выделенные нефтяные фракции подвергаются процессу гидроочистки, в ходе которого происходит удаление сернистых соединений и металлов, что позволяет получить ценное сырьё для нефтехимической отрасли [6, 7, 8]. Одним из перспективных и экологически чистых методов облагораживания тяжёлых нефтей является процесс низкотемпературного крекинга, который осуществляется при температуре 360 °C. Этот процесс позволяет снизить в составе тяжелой нефти содержание смолисто-асфальтеновых веществ и увеличить количество дистиллятных фракций [9, 10].

Особое внимание уделяется поиску и применению каталитических систем, обеспечивающих наибольшую эффективность этого процесса. Однако широкое применение современных высокоактивных катализаторов сопряжено с их высокой стоимостью, стремительным отравлением большим количеством дезактивирующих каталитические центры полиароматических и металлоконтактных соединений в составе тяжелых нефтей. Одним из возможных решений данной проблемы является использование добавок, созданных на основе природных минеральных

соединений, которые способны проявлять катализическую активность в реакциях крекинга углеводородов и отличаются доступностью, невысокой стоимостью, что позволяет применять их однократно. Минеральные добавки после отделения от продуктов крекинга быть использованы в технологиях получения асфальтобетонных конструкционных вяжущих, наполнителей гидроизоляционных и кровельных битумных материалов и т.д. [11, 12, 13].

В качестве природных соединений, обладающих значительным катализитическим действием широко известны, присутствующие в горных породах алюмосиликатные глинистые минералы [14]. Глинистые минералы, такие как каолинит, монтмориллонит, являются основными катализаторами превращений углеводородных флюидов в осадочной толще протекающих в природных гидротермальных процессах [15, 16]. Глинистые минералы как правило представляют собой соединения кремнезема – аллюмината, которые при высокой температуре способны вступать в реакцию с перегретым паром. Обладая электрофильными свойствами, Al^{+3} может избавиться от заряда, сформировать электронное поле и образовать гидроксильную группу с водой. Группа $SiO(OH)Al$ способна поляризоваться асимметрией окружающей среды, таким образом, получается сильная кислота. При высокой температуре глинистые минералы действуют как сильные кислоты и катализитический механизм превращения углеводородов протекает по карбокатионному механизму, т.е. кислотные центры на поверхности минеральной матрицы способствуют образованию карбокатиона. Катализитический эффект осуществляется путем разложения и передачи карбокатиона. Для ускорения реакций деструкции высокомолекулярных углеводородов широко используются соединения никеля, алюминия, железа [17, 18, 19].

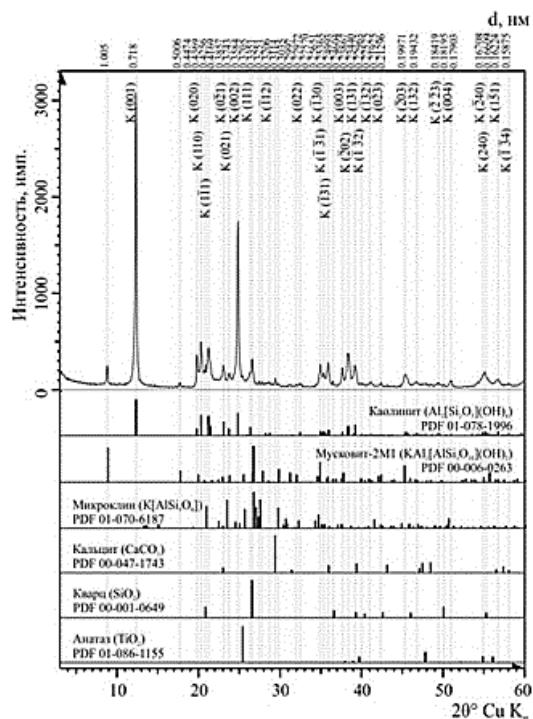
В настоящее время наблюдается увеличение количества полимерных отходов, не являющихся биоразлагаемыми, что неизбежно приводит к загрязнению окружающей среды. В среднем в России ежегодно образуется около 2 млн тонн не утилизируемых полимерных отходов. Полимерные отходы, характеризующиеся высоким содержанием водорода, могут служить его источником в процессах крекинга тяжелых нефтей с целью получения востребованного сырья для нефтехимического комплекса.

Таким образом, освоение месторождений тяжелых нефтей представляет собой перспективное направление, способное обеспечить будущие потребности мировой экономики в углеводородах. Однако для успешной реализации этого потенциала необходимо дальнейшее развитие научных, технологических и инновационных решений в области переработки тяжёлых высоковязких нефтей.

Работа посвящена изучению влияния каолина и поли- α -олефинов на процесс низкотемпературного крекинга тяжёлой нефти в целях снижения вязкости и улучшения её качества.

Материалы и методы

В экспериментальных исследованиях объектом являлась нефть, добытая из сложнопостроенной толщи карбонатных и терригенных коллекторов нижнего каменноугольного и девонского периодов западного склона Южно-Татарского свода, расположенного в Республике Татарстан. В качестве широкодоступной добавки процесса крекинга исследовалась минеральная добавка – каолин, состоящая из каолинита с примесью зёрен кварца, полевых шпатов, слюды и оксидов железа (рис. 1), характеризующаяся удельной поверхностью $\sim 23 \text{ м}^2/\text{г}$ и следующим дисперсным составом: 70 % масс. – фр. $2,94-6,38 \times 10^{-7} \text{ м}$ и 30 % масс. – фр. $0,53-0,85 \times 10^{-7} \text{ м}$. Каолин содержит алюмосиликаты, которые могут взаимодействовать с молекулами углеводородов, ускоряя химические реакции, развитая поверхность обеспечивает большую площадь контакта с молекулами углеводородов, что способствует более эффективному протеканию реакций крекинга.



<i>Состав</i>	<i>Содержание, %</i>
линит	86,0
ьцит	1,4
рц	1,5
ковит	8,0
таз	0,2
роклин	3,0

Рис. 1 – Рентгеноструктурный анализ добавки
Fig. 1 – X-ray structural analysis of the additive

Эксперименты проводились в реакторе периодического типа, оснащенного термопарой, манометром и игольчатым вентилем высокого давления для сброса газа в атмосферу перед выгрузкой продуктов крекинга. Для снижения интенсивности протекания вторичных реакций полимеризации и конденсации низкотемпературный крекинг нефти проводили под давлением

перегретого пара 8-12 МПа при температуре 360 °С (контроль). Перед началом первого эксперимента (1) готовилась реакционная смесь в виде эмульсии, состоящей из тяжелой высоковязкой нефти, содержащей 2 % каолина в соотношении с водой 4:1. Во втором эксперименте (2) к 2 % каолина добавляли 1 % масс. оксида никеля NiO . Известно, что многие органические кислоты могут оказывать каталитический эффект на реакции углеводородов различного строения, происходящие с участием глинистых минералов [17]. Третий эксперимент (3) отличался от предыдущего присутствием в реакционной среде монокарбоновой кислоты $C_2H_4O_2$. Полиолефины, обладающие высоким содержанием водорода, могут выступать в качестве его источника в термодеструктивных процессах. Четвертый эксперимент (4) отличался от второго присутствием в реакционной смеси поли- α -олефинов до 5 % масс. Совместный крекинг тяжелой нефти с поли- α -олефинами представляет собой перспективный метод утилизации полимерных отходов с получением облагороженного углеводородного сырья.

Отделение воды от продуктов крекинга выполнялось методом отстаивания. Экстракцией в аппарате Сокслета проводили отделение от жидких продуктов минеральных добавок. Определение количества асфальтенов было осуществлено с применением известного метода, заключающегося в осаждении в 40-кратном по объёму избытке нормального алкана. Разделение полученного таким образом остатка на насыщенные и ароматические концентраты, а также на бензольные и спиртобензольные, было проведено с помощью метода жидкостно-адсорбционной хроматографии, при этом применялся силикагель марки АСКГ. Вязкость определялась на вискозиметре Haake RheoStress 6000 с использованием измерительной ячейки «конус-плоскость», при этом диапазон скоростей сдвига менялся от 0,001 до 900 с^{-1} .

Обсуждение результатов

Низкотемпературный крекинг тяжелой нефти при температуре 360 °С в ходе контрольного эксперимента (контроль) сопровождается образованием газообразных продуктов до 1,2 % масс., в составе жидкого продукта незначительно увеличивается выход бензиновой фракции (*ф. н.к. - 200 °C*) с 5,6 до 9,8 % масс. и уменьшается содержание смолисто-асфальтеновых веществ (САВ) с 39,7 до 35 % масс. в основном за счет снижения бензольных смол (СБ) (рис. 2 и 3). Крекинг тяжелой нефти на развитой поверхности каолина в идентичных условиях значительно усиливает наблюдаемые тенденции в изменении состава конечного продукта, в процессы превращения вовлекаются САВ, их степень превращения увеличивается в два раза по сравнению с контрольным экспериментом (см. табл.). Крекинг нефти в присутствии каолина приводит к усилению наблюдаемых тенденций в изменении состава продукта (2).

Высокая удельная поверхность каолина ($\sim 23 \text{ м}^2/\text{г}$) свидетельствует о наличии в нём макро- и мезопор. Обладая развитой адсорбционной поверхностью для наиболее полярных компонентов тяжелых нефтей – смолисто-асфальтеновых веществ, каолин способствует ускорению и усилению их химических превращений в условиях низкотемпературного крекинга. Стоит отметить, что каталитические свойства каолина во многом зависят от его химического состава и структуры (рис. 1).

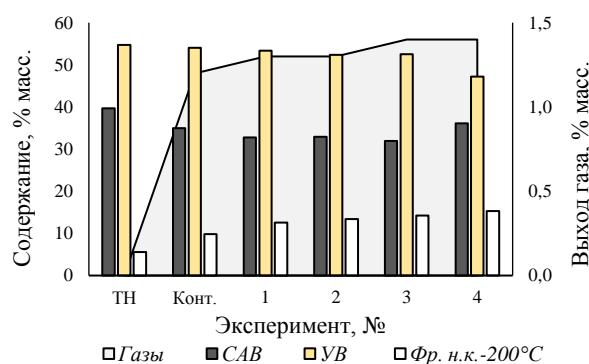


Рис. 2 – Состав продуктов облагораживания тяжелой нефти

Fig. 2 – Composition of heavy oil upgrading products

В процессе крекинга высокомолекулярных соединений тяжелых нефтей доминируют как реакции деструкции, протекающие с разрывом связей углерод–гетероатом ($C-S$), углерод–углерод ($C-C$), так и реакции дегидрирования нафтоароматических и ароматических соединений, являющихся основой нежелательных вторичных процессов конденсации и карбонизации смол и асфальтенов с образованием водорода. Появление в реакционной смеси водорода делает необходимым участие в процессе крекинга тяжелых нефтей известных каталитически активных соединений, обладающих гидрирующей функцией.

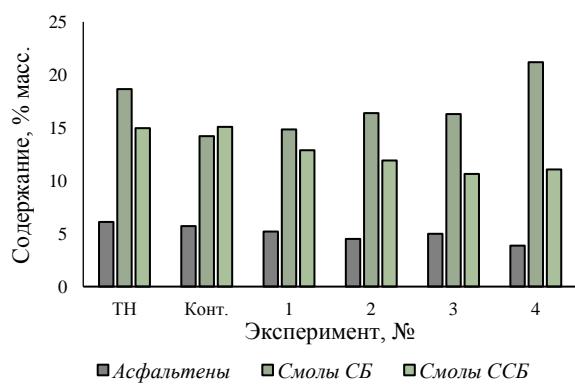


Рис. 3 – Состав смолисто-асфальтеновых веществ (CAB)

Fig. 3 – Composition of resinous asphaltene substances (RAS)

В связи с этим в третьем эксперименте в состав минеральной добавки был включен NiO , который при взаимодействии с водородом восстанавливается и ускоряет реакции гидрирования. Для интенсификации реакций гидрирования также было

увеличено давление в системе с 8 до 12 МПа. В составе конечных продуктов крекинга тяжелой нефти в присутствии каолина и NiO увеличивается количество фр. н.к.-200 °C до 14,2 % масс. (рис. 2), снижается количество смол с 33,6 до 28,3 % масс. (рис. 3), конверсия асфальтенов составила 26,3 %. Характерной особенностью третьего эксперимента является высокая степень превращения смолисто-асфальтеновых веществ, которая составляет 15,7 и 26,3 %.

Таблица 1 - Степень превращения смол и асфальтенов

Table 1 - Conversion of resins and asphaltenes

Эксперимент	Степень превращения, %	
	Смолы	Асфальтены
Контроль	12,8	6,2
Каолин	17,5	14,7
Каолин, NiO	15,7	26,3
Каолин, NiO , $C_2H_4O_2$	19,8	18,3
Каолин, Al_2O_3 , NiO , ПАО	4,1	21,6

При низкотемпературном крекинге тяжелой нефти в присутствии каолина, оксида никеля и монокарбоновой кислоты в составе CAB снижается количество смол спиртобензольных (ССБ) и увеличивается содержание асфальтенов (рис. 3). Присутствие в реакционной смеси полиолефинов в количестве 5 % масс. приводит к снижению в продуктах концентрации высокомолекулярных соединений с 4,9 до 3,8 % масс., с увеличением содержания СБ с 16,3 до 21,2 % масс. Вероятно, в процессе крекинга происходит дегидрирование и ароматизация полиолефинов с последующей поликонденсацией с образованием высокомолекулярных смолоподобных соединений, вместе с этим в составе продуктов увеличивается содержание легкокипящей фракции углеводородов до 15,3 % масс. Снижение в составе конечных продуктов доли смолисто-асфальтеновых веществ вместе с ростом содержания фракции н.к.-200 °C приводит к существенному снижению их вязкости ниже значений, характерных для исходной тяжелой нефти (рис. 3). Вязкость продуктов крекинга в значительной степени зависит от изменений в их составе.

Основной вклад в значения вязкости вносит количество легкокипящей фракции, насыщенных и ароматических углеводородов (УВ), а также межмолекулярные взаимодействия, обусловленные наличием большого количества полярных и гетероатомных соединений, молекул смол и асфальтенов, способных образовывать ассоциаты и агрегативные комбинации [29]. В результате крекинга тяжелой нефти в присутствии каолина (в первом эксперименте), несмотря на незначительные изменения в составе продуктов по сравнению с контрольным экспериментом (Конт.), вязкость сильно отличается. Вязкость нефти обусловлена наличием в ней природных асфальтенов, которые имеют «рыхлую» структуру. Возможно, снижение вязкости в продуктах крекинга связано с трансформацией молекул асфальтенов, а именно с

разрушением их боковых алифатических цепей и образованием более компактных вторичных молекул с высоким содержанием конденсированных структур. Продукт, полученный в результате крекинга тяжёлой нефти в присутствии каолина, оксида никеля и $C_2H_4O_2$, продемонстрировал самое значительное снижение вязкости — более чем на 60 %. Относительно высокой вязкостью обладает продукт крекинга тяжелой нефти в присутствии полиолефинов, отличающийся большим содержанием смол. Это обусловлено как высокой вязкостью самих смол, так и их способностью образовывать с молекулами асфальтенов надмолекулярные структуры, наделяющие продукт крекинга достаточной прочностью к сдвиговым деформациям.

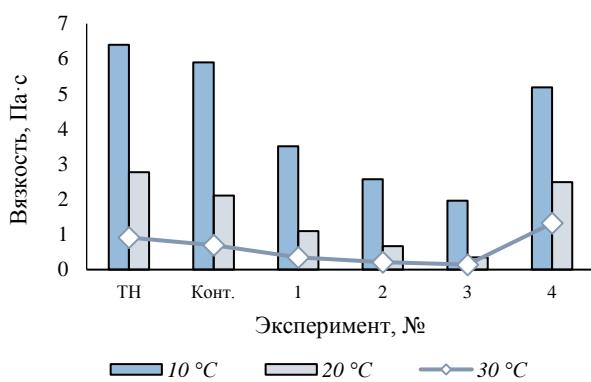


Рис. 4 – Вязкость исходной тяжелой нефти и продуктов облагораживания

Fig. 4 – The consistency of the crude oil and the processed products

Сравнительный анализ состава продуктов низкотемпературного крекинга тяжелой нефти при температуре 360 °C и давлении 8-12 МПа в присутствии каолина, NiO , $C_2H_4O_2$ и поли- α -олефинов позволил сделать следующие выводы. В результате крекинга в составе продуктов увеличивается количество фракции н.к.-200 °C. Каолин ускоряет и усиливает реакции деструкции смолисто-асфальтеновых веществ. Введение оксида никеля NiO в состав минеральной добавки и повышение давления в системе до 12 МПа приводит к конверсии асфальтенов более чем на 26 %. Введение 5 % полиолефинов снижает концентрацию асфальтенов и увеличивает содержание бензольных смол в продуктах крекинга. В результате процесса крекинга происходит снижение вязкости конечных продуктов за счёт уменьшения доли смолисто-асфальтеновых веществ и увеличения содержания легкокипящей фракции углеводородов.

Заключение

Использование каолина в качестве добавки при облагораживании состава тяжелой нефти в процессе низкотемпературного крекинга в среде перегретого пара представляет собой перспективное направление исследований, которое ведёт к созданию более эффективных и экологически чистых процессов переработки тяжелых нефтей. Однако использование каолина в качестве одноразового катализатора имеет

и некоторые недостатки. Каолин может содержать примеси, которые могут снижать его катализитическую активность или вызывать побочные реакции, что делает необходимым этапы его подготовки и активирования перед использованием. В целом, применение технологий облагораживания нетрадиционного нефтяного сырья вместе с полимерными отходами позволит увеличить ресурсную базу углеводородов, снизить зависимость от традиционных месторождений, что обеспечит устойчивое развитие нефтегазовой отрасли и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

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

- Г.П. Каюкова и др., Нефтяная наука и технологии 1680-1686 (2017)
- Г.П. Каюкова и др., Нефтяная наука и технологии 1687-1691 (2017)
- Л. Р. Байбекова и др., Международный журнал прикладной химии 593-599 (2015)
- А.А. Аласеева и др., Химия и технология топлив и масел 271-277 (2018)
- А. И. Лахова и др., Res. J. Appl. Sci. 917-921 (2015)
- С. М. Петров и др., Серия конференций ИОП: Науки о Земле и окружающей среде (2019)
- А. И. Лахова, С. М. Петров, Н. Ю. Башкирцева, Химия и технология топлив и масел 1-5 (2022)
- А. Г. Сафиуллина и др., Химия и технология топлив и масел 265-270 (2018)
- Р. Р. Закиева и др., Химия и технология топлив и масел 480-486 (2015)
- А. Лахова и др., Нефтяная наука и технологии 611-616 (2019)
- А. И. Лахова и др., Процессы 553 (2021)
- А. В. Вахин и др., Процессы 158 (2021)
- С. М. Петров и др., Международная многопрофильная научная конференция Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 455-460 (2018)
- С. М. Петров, Р. Солдатова, А. Лахова, Серия конференций ИОП: Науки о Земле и окружающей среде (2019)
- А. Г. Сафиуллина и др., Химия и технология топлив и масел 897-904 (2018)
- А. Носова и др., Нефтяная наука и технологии (2018)
- С. М. Петров и др., Научно-исследовательский журнал фармацевтических, биологических и химических наук 1624-1629 (2015)
- А. И. Лахова, С. М. Петров, Химия и технология топлив и масел 297-301 (2022)
- Р. Р. Закиева, С. М. Петров. Химия и технология топлив и масел 69-74 (2023)
- С. М. Петров и др., Нефть 216-223 (2024)
- С. М. Петров и др., Международный журнал прикладных инженерных исследований 56-61 (2015)
- И. Зайдуллин и др., Химия и технология топлив и масел 550-556 (2018)
- А. И. Лахова и др., Химия и технология топлив и масел 119-124 (2019)

24. А. А. Валиева и др., Химическая технология и металлургия 730-740 (2020)
25. С. М. Петров и др.. Международная многопрофильная научная геоконференция Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 359-366 (2018)
26. А. И. Лахова и др., Международная многопрофильная научная геоконференция: SGEM 375-382 (2017)
27. С. М. Петров и др., Индийский журнал науки и технологий 1-5 (2017)
28. С. М. Петров и др., Процессы 256 (2021)
29. А. И. Лахова и др., Журнал нефтяной науки и техники 385-390 (2017)

References

- 1.G.P. Kayukova et al., Petroleum Science and Technology 1680-1686 (2017)
- 2.G.P. Kayukova et al., Petroleum Science and Technology 1687-1691 (2017)
- 3.L. R. Baibekova et al., International Journal of Applied Chemistry 593-599 (2015).
- 4.A.A. Alaseeva et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 271-277 (2018)
- 5.A. I. Lakhova et al., Res. J. Appl. Sci. 917-921 (2015)
- 6.S. M. Petrov et al., IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences (2019)
- 7.A. I. Lakhova, S. M. Petrov, N. Yu. Bashkirtseva, Chemistry and technology of fuels and oils 1-5 (2022)
- 8.A. G. Saifulina. et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 265-270 (2018)
- 9.R. R. Zakieva et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 480-486 (2015)
10. A. Lakhova et al., Petroleum Science and Technology 611-616 (2019)
11. A. I. Lakhova et al., Processes 553 (2021)
12. A. V. Vakhin et al., Processes 158 (2021)
13. S. M. Petrov et al., International Multidisciplinary Scientific Geoconference Geodetic Geology and Mining Ecology Management, SGEM 455-460 (2018)
14. S. M. Petrov, R. Soldatova, A. Lakhova, IOP Conference Series: Earth Sciences and environment (2019)
15. A. G. Saifulina et al., Chemistry and technology of fuels and oils 897-904 (2018)
16. A. Nosova et al., Petroleum Science and Technology (2018)
17. S. M. Petrov et al., Scientific Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Food Sciences 1624-1629 (2015)
18. A. I. Lakhova, S. M. Petrov, Chemistry and technology of fuels and oils 297-301 (2022)
19. R. R. Zakieva, S. M. Petrov. Chemistry and Technology of Fuels and Oils 69-74 (2023)
20. S. M. Petrov et al., Oil 216-223 (2024)
21. S. M. Petrov et al., International Journal of Applied Engineering Research 56-61 (2015)
22. I. Zaydullin et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 550-556 (2018)
23. A. I. Lakhova et al., Chemistry and Technology of Fuels and Oils 119-124 (2019)
24. A. A. Valieva et al., Technology and Metallurgy Chemistry 730-740 (2020)
25. S. M. Petrov et al., International Multidisciplinary Scientific Geoconference "Management of Geology and Mining Ecology", SGEM 359-366 (2018)
26. A. I. Lakhova et al., International Multidisciplinary Scientific Geoconference: SGEM 375-382 (2017)
27. S. M. Petrov et al., Indian Journal of Science and Technology 1-5 (2017)
28. S. M. Petrov et al., Processes 256 (2021)
29. A. I. Lakhova et al., Journal of Petroleum Science and Technology 385-390 (2017)

© **Б. А. Шайхутдинов** – студент кафедры Химической технологии переработки нефти и газа (ХТПНГ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, sh.bulat0404@gmail.com; **М. Ю. Антонова** – студент кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **Л. С. Прокофьева** - магистрант кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **Ю. Х. Усманова** – к.т.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **Е. Г. Зайцева** – аспирант кафедры ХТПНГ, КНИТУ; **С. М. Петров** – к.т.н., доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ.

© **B. A. Shaikhutdinov** – Student of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (CTOGP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, sh.bulat0404@gmail.com; **M. Yu. Antonova** – Student of the CTOGP department, KNRTU; **L. S. Prokofieva** – Master-student of the CTOGP department, KNRTU; **Yu. Kh. Usmanova** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the CTOGP department, KNRTU; **E.G. Zaitseva** – PhD-student of the CTOGP department, KNRTU; **S. M. Petrov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the CTOGP department, KNRTU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 18.04.25.
Дата принятия рукописи в печать – 05.12.25