

М. Г. Васильева, М. Ю. Антонова, Л. С. Прокофьева,
Ю. Х. Усманова, Е. Г. Зайцева, С. М. Петров

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ КРЕКИНГ СВЕРХВЯЗКОЙ НЕФТИ В ПРИСУТСТВИИ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ ЦИНКА И АЛЮМИНИЯ

Ключевые слова: сверхвязкая нефть, каталитический крекинг, асфальто-смолистые соединения, реологические характеристики, неньютоновская жидкость, нефтяная дисперсная система, субкритическая вода.

Актуальность исследования влияния наночастиц металлов на низкотемпературный крекинг тяжёлой нефти обусловлена необходимостью разработки эффективных и экологически чистых методов переработки трудноизвлекаемых углеводородов. Тяжелая нефть, содержащая значительное количество смолисто-асфальтеновых компонентов, требует особых условий и технологий для её переработки. В статье рассматриваются результаты исследования влияния наночастиц металлов Zn и Al на изменения состава и вязкостных свойств продуктов низкотемпературного крекинга тяжёлой нефти. Эксперименты проводились при температуре 360 °C под давлением перегретого пара 160 бар в среде субкритического водного флюида. Проведение крекинга в субкритическом водном флюиде позволяет уменьшить образование побочных продуктов. В продуктах крекинга нефти увеличивается содержание смолы снижается выход легкокипящих фракций. Напротив, присутствие в реакционной среде наночастиц металлов приводит к снижению содержания смолисто-асфальтеновых веществ и увеличению количества насыщенных и ароматических углеводородов, что указывает на более эффективное разрушение высокомолекулярных соединений нефти. Наибольшая деструкция смолисто-асфальтеновых веществ происходит при крекинге тяжелой нефти с наночастицами Zn, с конверсией асфальтенов 21 %. Тяжёлая нефть и продукты крекинга, содержащие значительное количество смолисто-асфальтеновых компонентов, демонстрируют неньютоновское поведение с вязкопластичными свойствами. В субкритическом водном флюиде вязкость дополнительно уменьшается вследствие увеличения содержания углеводородов и снижения концентрации смол и асфальтенов. При участии в процессе крекинга наночастиц вязкость снижается, причём наиболее заметное уменьшение наблюдается при использовании ZnO. Крекинг нефти в присутствии наночастиц изменяет состав и строение нефтяных дисперсных систем, уменьшается доля ядра. Крекинг в субкритическом водном флюиде с ZnO приводит к наибольшему увеличению количества дисперсионной среды и снижению доли сольватной оболочки. Показано, что индикаторами трансформации структуры нефтяных дисперсных систем могут служить ИК-спектральные коэффициенты. Исследование влияния наночастиц металлов на процесс крекинга тяжёлой нефти может иметь практическое значение для нефтеперерабатывающей промышленности. Наночастицы металлов, такие как Zn и Al, могут значительно изменить состав и свойства нефти, снижая затраты на её дальнейшую переработку. Результаты исследования могут быть полезны для оптимизации технологий переработки нефти и улучшения экологических характеристик процесса.

М. Г. Васильева, М. Ю. Антонова, Л. С. Прокофьева,
Ю. Х. Усманова, Е. Г. Зайцева, С. М. Петров

LOW TEMPERATURE CRACKING OF SUPER-VISCOUS OIL IN THE PRESENCE OF NANOPARTICLES OF ZINC AND ALUMINUM OXIDES

Keywords: superviscous oil, catalytic cracking, asphalt-resin compounds, rheological characteristics, non-Newtonian fluid, oil dispersed system, subcritical water.

The relevance of studying the effect of metal nanoparticles on low-temperature cracking of heavy oil is due to the need to develop efficient and environmentally friendly methods for processing hard-to-recover hydrocarbons. Heavy oil containing a significant amount of resinous-asphaltene components requires special conditions and technologies for its processing. The article discusses the results of studying the effect of metal nanoparticles Zn and Al on changes in the composition and viscosity properties of products of low-temperature cracking of heavy oil. The experiments were carried out at a temperature of 360 °C under a superheated steam pressure of 160 bar in a subcritical aqueous fluid. Cracking in a subcritical water fluid reduces the formation of by-products of the process. In oil cracking products, the tar content increases and the yield of low-boiling fractions decreases. On the contrary, the presence of metal nanoparticles in the reaction medium leads to a decrease in the content of resinous-asphaltene substances and an increase in the amount of saturated and aromatic hydrocarbons, which indicates a more efficient destruction of high-molecular-weight oil compounds. The greatest destruction of resinous-asphaltene substances occurs during cracking of heavy oil with Zn nanoparticles, with an asphaltene conversion of 21 %. Heavy oil and cracking products containing a significant amount of resinous-asphaltene components exhibit non-Newtonian behavior with viscoplastic properties. In a subcritical aqueous fluid, the viscosity is further reduced due to an increase in the content of hydrocarbons and a decrease in the concentration of resins and asphaltenes. When nanoparticles participate in the cracking process, the viscosity decreases, and the most noticeable decrease is observed when using ZnO. Oil cracking in the presence of nanoparticles changes the composition and structure of oil dispersed systems, and the fraction of the core decreases. Cracking in a subcritical aqueous fluid with ZnO leads to the greatest increase in the amount of dispersion medium and a decrease in the proportion of the solvate shell. It is shown that IR spectral coefficients can serve as indicators of transformation of the structure of oil dispersed systems. The study of the effect of metal nanoparticles on the cracking process of heavy oil can be of practical importance for the oil refining industry. Metal nanoparticles, such as Zn and Al, can significantly change

the composition and properties of oil, reducing the cost of its further processing. The results of the study can be useful for optimizing oil refining technologies and improving the environmental characteristics of the production process.

Введение

В последние десятилетия мировая экономика сталкивается с проблемой истощения запасов традиционной нефти, добыча которой экономически оправдана при текущих технологиях и рыночных условиях. Снижение объемов легкодоступных углеводородов требует поиска альтернативных источников сырья для поддержания устойчивого развития энергетической отрасли [1]. Неконвенциональные ресурсы углеводородов, такие как тяжелая и сланцевая нефть, природные битумы, представляют собой перспективные альтернативы традиционным источникам нефти. Их разработка и освоение в настоящее время требуют применения инновационных технологий и значительных капитальных вложений, но в долгосрочной перспективе они могут обеспечить устойчивое развитие энергетического сектора. По оценкам экспертов, глобальные запасы сверхвязкой нефти превышают 1 триллион тонн, что делает ее одним из ключевых источников для обеспечения энергетической безопасности в долгосрочной перспективе [2, 3]. Добыча сверхвязкой нефти сопряжена с рядом технологических и экологических вызовов. К основным из них относятся высокая капиталоемкость, необходимость применения инновационных методов добычи и переработки, а также риск загрязнения окружающей среды.

Традиционные методы переработки легких нефтей сталкиваются с серьезными вызовами при работе с сверхвязкими и тяжелыми нефтями, содержащими значительные количества асфальтосмолистых соединений, полiarоматических углеводородов и гетероатомов, требуя разработки и применения инновационных технологий [4, 5].

Тяжелые нефти представляют собой сложную смесь углеводородов, отличающуюся высокой вязкостью и высоким содержанием высокомолекулярных соединений. Эти свойства делают их переработку и транспортировку более трудоемкими и затратными процессами. Одним из ключевых факторов, влияющих на эти свойства, являются асфальтеновые агрегаты, образующие наноразмерные структуры. Асфальтеновые агрегаты состоят из молекул асфальтенов стабилизованных молекулами смол. [6, 7, 8]. Стабилизирующая роль смол в формировании асфальтеновых агрегатов имеет важное значение для понимания процессов, происходящих в тяжелых нефтях. [9, 10]. Для понимания особенностей тяжелых нефтей и их реологических характеристик ученые применяют концепцию сложных структурных единиц (ССЕ). Эти единицы представляют собой иерархически организованные структуры, состоящие из ядра (Яд), сольватной оболочки (Со) и дисперсной среды (ДС). Ядро ССЕ состоит из молекул асфальтенов [11, 12, 13]. Вокруг ядра располагается сольватная оболочка, состоящая из молекул смол. Дисперсная среда включает в себя насыщенные и ароматические углеводороды. Такая структура обеспечивает

стабильность и устойчивость ССЕ. Для изучения взаимодействия между компонентами нефтяной дисперсной системы (НДС) и понимания подвижности тяжелых нефтей применяются реологические методы. Эти методы позволяют определить силу и энергию взаимодействия между компонентами НДС [14, 15]. Для описания реологического поведения тяжелых нефтей необходимо учитывать структурные особенности и межмолекулярные взаимодействия. Тяжелые нефти обычно не подчиняются закону Ньютона, что связано с особенностями межмолекулярных взаимодействий. Это приводит к нелинейной зависимости напряжения сдвига от скорости деформации. П.А. Ребиндер предложил понятия эффективной и структурной вязкости. Эффективная вязкость определяется как максимальная вязкость практически неразрушенной структуры, соответствующей верхней части кривой течения. Структурная вязкость, в свою очередь, соответствует минимальной вязкости полностью разрушенной структуры и подчиняется закону Ньютона. Эти константы позволяют более точно описать реологическое поведение тяжелых нефтей.

В России сосредоточены значительные запасы таких нефтей, что требует разработки эффективных и экономически целесообразных технологий их переработки. В последние годы активно развиваются новые подходы к переработке тяжелых нефтей, такие как висбрекинг, гидроочистка газойлей, гидрокрекинг остатков и газификация тяжелого нефтяного сырья. Одним из наиболее перспективных методов первичной переработки тяжелых нефтей является низкотемпературный крекинг в субкритическом водном растворе. Процесс отличается минимальными затратами на оборудование и обслуживание, что делает его привлекательным для промышленного применения. Низкотемпературный крекинг в среде субкритического водного флюида представляет собой процесс термического разложения тяжелых нефтей при температуре ниже критической точки воды [16, 17, 18]. Диаграмма состояния воды показывает, что при повышении давления и температуры вода может переходить из одного агрегатного состояния в другое. Так при давлении от 5 до 10 МПа и температуре 360 °C вода переходит из перегретого пара в субкритический водный флюид [19, 20]. Это состояние характеризуется уникальными физико-химическими свойствами. Переход перегретого пара в субкритическое состояние сопровождается снижением pH воды до 3,5. В этом состоянии молекулы воды объединяются в метастабильные кластеры, состоящие из 5–50 молекул, что способствует диффузии молекул воды в асфальтеновые агрегаты. Метастабильные кластеры молекул воды также являются источником ионов H⁺ и OH⁻. Диффузия молекул воды в асфальтеновые агрегаты ускоряет реакции высокотемпературного гидролиза. Вода является одним из самых доступных, экономичных, безопасных и экологичных растворителей на Земле [21, 22]. Использования воды

в качестве среды процесса крекинга представляет собой перспективное направление исследований, которое может привести к созданию новых технологий переработки тяжелых нефтей. В научной литературе представлено большое количество работ, посвященных исследованию каталитической активности различных соединений в процессе крекинга тяжелых нефтей [23, 24, 25]. Перспективными катализаторами данного процесса являются наночастицы металлов синтезированные с использованием различных методик. Сравнительный анализ с традиционными катализаторами показал, что наночастицы металлов обладают более высокой активностью и эффективностью в разрушении сложных асфальтеновых молекул нефти. Это связано с их уникальными физико-химическими свойствами, такими как высокая поверхностная активность и способность к адсорбции. Исследования показали, что добавление цинка и его соединений в процесс крекинга тяжелой нефти приводит к значительному увеличению количества углеводородов в продуктах. Что свидетельствует о каталитической активности цинка, его способности активировать реакции, способствующие разрыву углерод-углеродных связей и образованию лёгких углеводородов [26]. Также было обнаружено, что некоторые соединения металлов, таких как кобальт, никель, железо, молибден и алюминий, позволяют снизить вязкость тяжёлой нефти в процессе её термического превращения [27, 28].

Цель работы – исследование влияния оксидов алюминия и цинка на процесс низкотемпературного крекинга тяжёлой нефти в субкритическом водном флюиде.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны образцы тяжёлой высоковязкой нефти Ашальчинского месторождения расположенного на западном склоне Южно-Татарского свода Республики Татарстан. Крекинг тяжёлой нефти (TH) проводили в закрытом реакторе при температуре 360 °C и давлении 150 бар. Соотношение нефти к воде составляло 3:1. Наночастицы оксидов цинка и алюминия добавлялись в количестве 2 % масс. на нефть. С увеличением температуры и давления вода переходила в субкритическое состояние. В первом эксперименте участвовала только тяжелая нефть. Второй и третий эксперименты отличались от первого наличием в реакционной среде наночастиц оксида алюминия (NANOBYK-3600) и цинка (NANOBYK-3840) с размерами 40 нм стабилизованных неионогенным ПАВ. Компонентный состав тяжелой нефти до и после экспериментов изучался в соответствии с методикой SARA анализа [29, 30]. Спектральные коэффициенты нефтяных дисперсных систем были рассчитаны на основе данных полученных с помощью ИК Фурье спектрофотометра «Vector» фирмы «Bruker» (США) [31, 32]. Реологические свойства изучались с помощью ротационного вискозиметра Haake Rheostress (Германия).

Обсуждение результатов

После низкотемпературного крекинга содержание насыщенных и ароматических углеводородов в тяжелой нефти практически не меняется, снижается выход легкокипящих соединений (н.к.-200 °C) с 5 до 3% масс. и увеличивается содержание смол и асфальтенов с 30 до 42% масс. (рис. 1). Высокое давление усиливает интенсивность реакций поликонденсации.

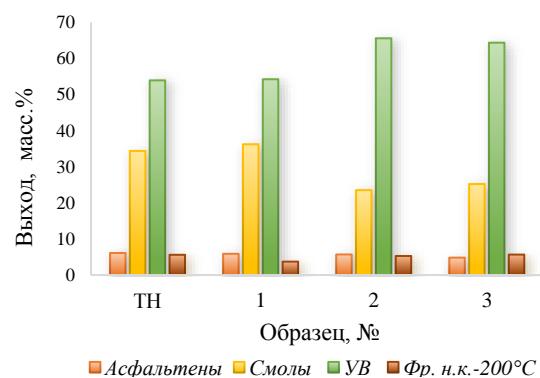


Рис. 1 – Выход продуктов крекинга

Fig. 1 – Yield of cracking products

Исследования крекинга тяжёлой нефти с применением наночастиц металлов демонстрируют их значительное влияние на состав и реологические характеристики жидких продуктов (рис. 2 и 3).

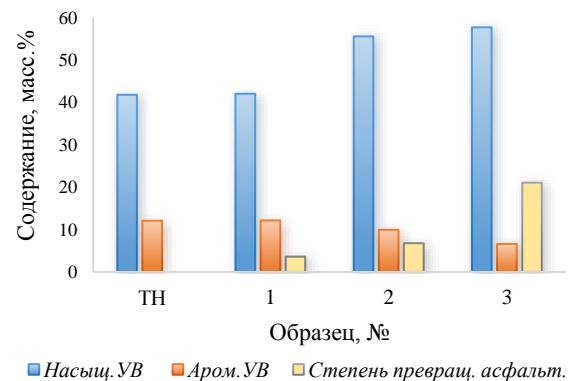


Рис. 2 – Содержание насыщенных и ароматических углеводородов в составе продуктов крекинга

Fig. 2 – Content of saturated and aromatic hydrocarbons in the composition of cracking products

Анализ компонентного состава реакционной среды выявил, что присутствие наночастиц металлов способствует значительному ускорению первичных реакций крекинга смол. В результате этого содержание смол в конечных продуктах уменьшается с 36 до 23-25 % масс., при этом количество легкокипящих углеводородов остаётся практически неизменным. Наночастицы ZnO демонстрируют наиболее высокую степень превращения асфальтенов, достигая 21%. В составе продуктов наблюдается увеличение содержания насыщенных углеводородов с 41 до 55-57% масс., в то время как

количество ароматических углеводородов снижается с 12 до 6-10% масс.

Компонентный состав тяжелой нефти и жидких продуктов крекинга существенно влияет на их вязкостные свойства (рис. 3). В частности, высокое содержание смолисто-асфальтеновых компонентов в тяжелой нефти и продуктах крекинга делает их подобными неньютоновским жидкостям с вязкопластичными свойствами. В результате изменений в составе продукта крекинга тяжелой нефти значения эффективной или структурной вязкости снижаются с 11340 до 9520 мПа^{*с}, вязкость разрушенной структуры уменьшается незначительно с 8900 до 8200 мПа^{*с}.

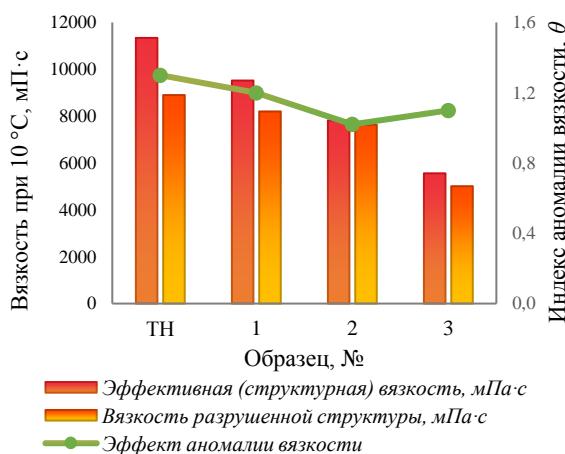


Рис. 3 – Вязкость тяжелой нефти и жидких продуктов крекинга

Fig. 3 – Viscosity of heavy crude oil and liquid cracking products

Особенностью продуктов крекинга, полученных в присутствии наночастиц металлов, являются относительно низкие значения эффективной вязкости и вязкости разрушенной структуры: 7820 и 7630 мПа^{*с} для наночастиц алюминия и 5560 и 5010 мПа^{*с} для наночастиц цинка, соответственно. Индекс аномалии вязкости жидких продуктов крекинга варьируется в интервале от 1 до 1,1, что указывает на устойчивость надмолекулярных структур к сдвиговым деформациям (рис. 3). Это происходит благодаря увеличению содержания углеводородов и уменьшению концентрации смол и асфальтенов. Вязкость нефти сильно зависит от межмолекулярного взаимодействия асфальтенов и смол. В процессе течения в переносе массы участвуют не только отдельные молекулы, но и более крупные надмолекулярные структуры, образующие нефтяные дисперсные системы (рис.4). В процессе крекинга состав продуктов изменяется, что влияет на структуру нефтяных дисперсных систем. Дисперсионная среда становится более заметной, а доля сложных структур уменьшается.

В продуктах крекинга, содержащих микрочастицы алюминия и цинка, также происходят изменения в структуре ядра и оболочки, состоящих из смол и асфальтенов. Особенность в системе, где крекинг осуществляется в субкритической воде с участием цинка, наблюдается увеличение дисперсионной

способности (ДС) и снижение концентрации смол (Со). Состав нефтяных дисперсных систем как количественный, так и качественный — играет ключевую роль в определении их реологических свойств. ИК-спектральные коэффициенты могут служить количественным индикатором изменений в структуре элементов НДС (рис.5).

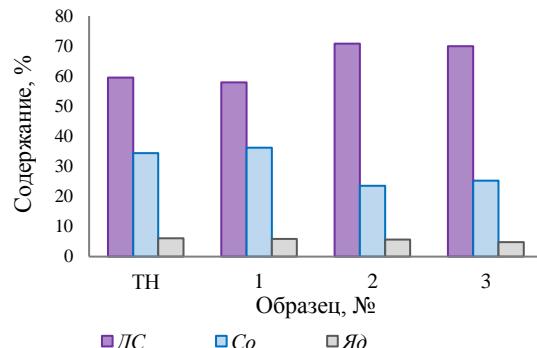


Рис. 4 – Состав нефтяной дисперсной системы тяжелой нефти и жидких продуктов крекинга

Fig. 4 – Composition of the petroleum dispersed system of heavy oil and liquid cracking products

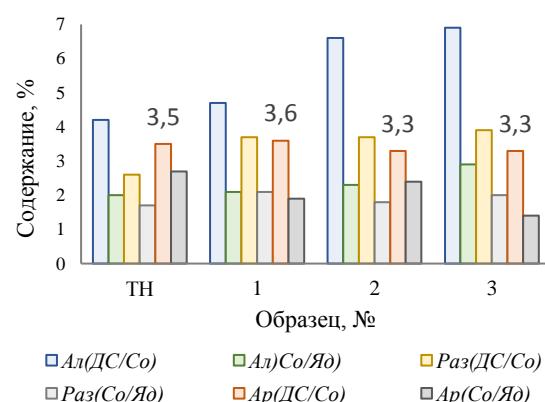


Рис. 5 – Спектральные коэффициенты средства дисперсных систем тяжелой нефти и жидких продуктов крекинга

Fig. 5 – Spectral affinity coefficients of dispersed systems of heavy oil and liquid cracking products

В процессе крекинга тяжёлой нефти, который осуществлялся с использованием наночастиц в условиях субкритического водного флюида, наблюдается значительное ускорение реакций дегидрирования и поликонденсации. В результате содержание ароматических соединений в дисперсионной среде (ДС) по отношению к сольватной оболочке (Со) возрастает с 3,6 до 3,3. Одновременно с этим ароматичность сольватной оболочки в НДС жидкого продукта крекинга нефти с Zn уменьшается с 2,7 до 1,4. Образующийся водород участвует в процессе гидрирования продуктов крекинга, что приводит к увеличению доли алифатических соединений в дисперсионной среде по сравнению с сольватной оболочкой (ДС/Со), а также показателей алифатичности и разветвлённости Со/Яд, что указывает на более активное отщепление алкильных заместителей от надмолекулярных

структур ядра ССЕ по сравнению с высокомолекулярными соединениями находящимися в составе Со. Образующиеся низкомолекулярные соединения накапливаются в дисперсионной среде продуктов крекинга. Снижение спектральных коэффициентов ароматичности ДС/Со и Со/Яд указывает на интенсивные процессы карбонизации смол и асфальтенов.

Заключение

В ходе исследований было обнаружено, что при крекинге тяжёлой нефти в условиях температуры 360 °С и давления 160 бар в жидких продуктах наблюдается незначительное увеличение количества смолисто-асфальтеновых веществ и снижение содержания легкокипящих фракций выкипающих до 200 °С. Введение наночастиц алюминия и цинка в тех же условиях оказывает существенное влияние на степень превращения асфальтенов и перераспределение насыщенных и ароматических соединений при этом количество смол и легкокипящих углеводородов в конечных продуктах остается практически неизменным. В результате низкотемпературного крекинга тяжелой нефти с участием наночастиц в жидких продуктах наблюдается увеличение дисперсионной среды и уменьшение количества сложных структурных

Литература

1. Г.П. Каюкова, Нефтяная наука и техника 35, 16, 1680-1686 (2017).
2. Г. П. Каюкова, Нефтяная наука и техника 35, 16, 1687-1691 (2017).
3. С. Петров, Р. Солдатова, А. Лахова, Серия Конференций ИОР: Землетрясения и Наука Об Окружающей Среде 1, 282, 012015 (2019).
4. А. А. Аласеева и эл., Химия и технология топлив и масел 3, 54, 271-277 (2018).
5. Л. Байбекова и эл., Международный журнал прикладной химии 11, 5, 593-599 (2015).
6. С. Петров и эл., Серия Конференций ВГД: Землетрясения и Наука Об Окружающей Среде 282, 1, 012004(2019).
7. А. Лахова, С. М. Петров, Н. Ю. Башкирцева, Химия и технология топлив и масел, 58, 1, 1-5 (2022).
8. А. Г. Сафулина и эл., Химия и технология топлив и масел 54, 3, 265-270 (2018).
9. П. Р. Закиева и эл., Химия и технология топлив и масел 51, 5, 480-486 (2015).
10. А. Лахова и эл., Нефтяная наука и техника 37, 5, 611-616 (2019).
11. А. Лахова и эл., Процессы 9, 3, 553 (2019).
12. А. В. Вахин и эл., Процессы 9, 1, 158 (2021).
13. С. М. Петров и эл., Международная междисциплинарная научная геоконференция: SGEM 18, 1.4, 455-460 (2018).
14. А. И. Лахова и эл., Отв . J. Приложение. Sci 10, 12, 917-921 (2015).
15. С. М. Петров и эл., Процессы 9, 2, 256 (2021).
16. А. Носова и эл., Нефтяная наука и техника 36, 13, 1001-1006 (2018).
17. С. М. Петров и эл., Журнал Фармацевтических, Биологических и химических наук 6, 6, 1624-1629 (2015).
18. А. Лахова, С. М. Петров, Химия и технология топлив и масел 58, 2, 297-301 (2022).
19. П. Р. Закиева, С. М. Петров, Химия и технология топлив и масел 59, 1, 69-74 (2023).
20. С. М. Петров и эл., Нефть 10, 2, 216-223 (2024).
21. С. М. Петров и эл., Международный журнал прикладных инженерных исследований 10, 24, 44656-61 (2015).
22. Дж. Зайдуллин и эл., Химия и технология топлив и масел 54, 5, 550-556 (2018).
23. А. Лахова и эл., Химия и технология топлив и масел 55, 2, 119-124 (2019).
24. А. А. Валиева и эл., Химическая технология и металлургия 55, 4, 730-740 (2020).
25. С. М. Петров, и эл., Международная Междисциплинарная научная геоконференция "Маркшейдерская геология и Управление экологией горного дела", SGEM 18, 359-366 (2018).
26. Лю И. Поклонник Х., Энергия и топливо 16, 4, 842-846 (2002).
27. П. Д. Кларк и эл., Топливо 66, 12, 1699-1702 (1987). 28. П. Д. Кларк, М. Кирк, Энергия и топливо 8, 2, 380-387 (1994).
29. А. Лахова и эл., Международная междисциплинарная научная геоконференция: SGEM 17, 1.3, 375-382 (2017).
30. С. М. Петров и эл., Индийский научно-технический журнал 10, 1, 1-5 (2017).
31. А. Г. Сафулина и эл., Химия и технология топлив и масел 53, 6, 897-904 (2018).
32. А. Лахова и эл., Журнал нефтяной науки и техники 153, 385-390 (2017).

References

1. G.P. Kayukova, Oil Science and Technology, 35, 16, 1680-1686 (2017).
2. G. P. Kayukova, Oil Science and Technology, 35, 16, 1687-1691 (2017).
3. S. Petrov, R. Soldatov, A. Lakhova, IOP Conference Series: 1 Year of Environmental Earthquake Science 1, 282, 012015 (2019).
4. A. A. Alaseeva, The Chemistry and Technology of Fuels 3, 54, 271-277 (2018).
5. L. Baibekova, International Journal of Applied Chemistry 11, 5, 593-599 (2015).

единиц и доли ядра в них. Увеличивается алифатичность дисперсионной среды и ароматичность ядра сложных структурных единиц. Изменения, происходящие в составе нефтяных дисперсных систем жидких продуктов крекинга, приводят к значительному снижению индексов аномалии вязкости и уменьшению вязкости разрушенной структуры на 42-56% по сравнению с исходной нефтью. Снижение вязкости позволяет сократить затраты на их транспортировку. Облегчённая транспортировка по трубопроводам способствует повышению эффективности и экономичности логистических процессов.

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»

6. S. Petrov, Conferences of this VG series: Earthquake and Environmental Science 282, 1, 012004(2019).
7. A. Lakhova, S. M. Petrov, N.U. Bashkirtseva, The Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 58, 1, 1-5 (2022).
8. A. G. Safulina, Chemistry and Technology of Oils and Fuels 54, 3, 265-270 (2018).
9. P. R. Zakieva, Chemistry and Technology of Oils and Fuels 51, 5, 480-486 (2015).
10. A. Lakhova, Petroleum Science and Technic 37, 5, 611-616 (2019).
11. A. Lakhova, Processes 9, 3, 553 (2019).
12. A.V. Vahin, Processes 9, 1, 158 (2021).
13. S. M. Petrov, Interdisciplinary International Scientific Geoconference SGEM, 18, 1.4, 455-460 (2018).
14. A. I. Lakhova, Rel. J. Application. Sci 10, 12, 917-921 (2015).
15. S. M. Petrov, Processes 9, 2, 256 (2021).
16. A. Nosova, Petroleum Science and Technology, 36, 13, 1001-1006 (2018).
17. S. M. Petrov, Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences Journal, 6, 6, 1624-1629 (2015).
18. A. Lakhova, S. M. Petrov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 58, 2, 297-301 (2022).
19. P. R. Zakieva, S. M. Petrov, Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 59, 1, 69-74 (2023).
20. S. M. Petrov, Petroleum 10, 2, 216-223 (2024).
21. S. M. Petrov., International Journal of Applied Research and Engineering 10, 24, 44656-61 (2015).
22. Dzh. Zaidullin, Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 54, 5, 550-556 (2018).
23. A. Lakhova, Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 55, 2, 119-124 (2019).
24. A. A. Valieva, Chemical Technology and Metallurgy, 55, 4, 730-740 (2020).
25. S. M. Petrov, Interdisciplinary International Scientific Geoconference "Ecological Geology and Management of mining ecology", SGEM, 18, 359-366 (2018).
26. Lu. I. Fan X, Fuel and Energy 16, 4, 842-846 (2002).
27. P. D. Clarkey, Fuel 66, 12, 1699-1702 (1987).
28. P. D. Clark, M. Kirk, Fuel and Energy, 8, 2, 380-387 (1994).
29. A. N. Lakhova, Interdisciplinary International Scientific Geoconference: SGEM, 17, 1.3, 375-382 (2017).
30. S. M. Petrov., Indian Scientific and Technical Journal, 10, 1, 1-5 (2017).
31. A. G. Safulina, Chemistry and Technology of Oil and Fuels, 53, 6, 897-904 (2018).
32. A. Lakhova, Journal of Petroleum Science and Technology, 153, 385-390 (2017).

© М. Г. Васильева – студент кафедры Химической технологии переработки нефти и газа (ХТПНГ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, vasileva.maria.2005@mail.ru; 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.

© M. G. Vasil'eva – Student of the Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (CTOGP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, vasileva.maria.2005@mail.ru; M. Yu. Antonova – Student of the CTOGP department, KNRTU; L. S. Prokof'eva – 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 – 15.04.25.
Дата принятия рукописи в печать – 13.06.25.