

УДК 553.611.6:665.761.6

П. Ф. Гришин, А. А. Ермак

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой

**ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ АКТИВНОЙ ГЛИНЫ ПРИ АДСОРБЦИОННОЙ
ДООЧИСТКЕ ГИДРОКРЕКИНГОВОГО МАСЛА И ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ
РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОЙ ГЛИНЫ**

Метод адсорбции является одним из способов доочистки базовых масел с целью улучшения их показателей качества и цвета. Цель работы – изучение изменения свойств активной глины в процессе адсорбционной очистки гидрокрекингového масла и после проведения окислительной регенерации отработанной глины. Изучение свойств исходной, отработанной и регенерированной глины проводилось при помощи анализатора площади поверхности и распределения пор BELSORP MAX. Определены истинная плотность образцов глины и изотермы адсорбции / десорбции ими азота при 77 К. Представлены результаты анализа изотерм адсорбции азота образцами глины с использованием моделей адсорбции Ленгмюра и BET. Анализ распределения пор по размерам в исследуемых образцах глины проводился с применением метода INNES. Установлено, что в ходе адсорбционной доочистки гидрокрекингového масла наблюдается уменьшение объема пор и удельной поверхности активной глины. При этом снижается прочность связи молекул адсорбируемых веществ с поверхностью глины и уменьшается ее поверхность. Показано, что эффективность адсорбента, используемого в процессе адсорбционной доочистки гидрокрекингového масла, определяется главным образом полярностью его поверхности. Чем выше полярность поверхности адсорбента, тем больше ее сорбционной емкости по отношению к удаляемым из очищаемого масла смолам.

Ключевые слова: адсорбционная очистка масла, активная глина, окислительная регенерация, изотермы адсорбции, изменение свойств.

Для цитирования: Гришин П. Ф., Ермак А. А. Изменение свойств активной глины при адсорбционной доочистке гидрокрекингového масла и окислительной регенерации отработанной глины // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 1 (277). С. 68–74. DOI: 10.52065/2520-2669-2024-277-9.

P. F. Grishin, A. A. Yermak

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk

**CHANGES IN THE PROPERTIES AND DISTRIBUTION OF PORES
IN ACTIVE CLAY DURING PURIFICATION OF HYDROCRACKING OIL
AND OXIDATIVE REGENERATION OF SPENT CLAY**

The adsorption method is one of the ways to refine base oils in order to improve their quality and color. The aim of the work is to study changes in the properties of active clay during the adsorption purification of hydrocracking oil and after oxidative regeneration of spent clay. The properties of the initial, spent and regenerated clay were studied using the BELSORP MAX surface area and pore distribution analyzer. The true density of clay samples and the isotherms of nitrogen adsorption/desorption by them at 77 K. have been determined. The results of the analysis of nitrogen adsorption isotherms by clay samples using the Langmuir and BET adsorption models are presented. The analysis of the pore size distribution in the studied clay samples was carried out using the INNES method. It was found that during the adsorption post-treatment of hydrocracking oil, a decrease in the pore volume and specific surface area of the active clay is observed. At the same time, the bond strength of the molecules of the adsorbed substances with the clay surface decreases and its surface decreases. It is shown that the effectiveness of the adsorbent used in the process of adsorption post-treatment of hydrocracking oil is mainly determined by the polarity of its surface. The higher the polarity of the adsorbent surface, the greater its sorption capacity relative to the resins removed from the oil to be cleaned.

Keywords: adsorption oil purification, active clay, oxidative regeneration, adsorption isotherms, change of properties

For citation: P. F. Grishin, A. A. Yermak. Changes in the properties and distribution of pores in active clay during purification of hydrocracking oil and oxidative regeneration of spent clay. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024. no. 1 (277), pp. 68–74 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2024-277-9.

Введение. Гидрогенизационные процессы производства базовых масел позволяют получать высококачественные гидрокрекинговые товарные масла с улучшенными техническими характеристиками по сравнению с традиционными минеральными маслами: высоким индексом вязкости, лучшей приемистостью к присадкам, ультранизким содержанием соединений серы и ароматических углеводородов [1–3]. Однако гидрокрекинговые масла обладают низкой окислительной стабильностью. Интенсификация процессов окисления масел способствуют повышенной температуре, облучение светом и контакт с кислородом воздуха. В результате окисления ухудшается цвет масла, увеличивается содержание смол, повышается коррозионная активность и склонность к образованию осадка. Наиболее эффективным способом повышения окислительной устойчивости гидрокрекинговых масел является введение в их состав ингибиторов процесса радикально-цепного окисления углеводородов [4, 5]. Однако данный способ не позволяет улучшать цвет базового масла и удалять из него наименее устойчивые к окислению соединения, в частности олефины, нафтено-ароматические углеводороды и смолы.

Одним из способов улучшения цвета депарафинизированного селективными растворителями гидрокрекингового масла и повышения его устойчивости к окислению под действием ультрафиолетового света является проведение адсорбционной очистки методом перколяции [6]. В качестве адсорбента могут использоваться: земля Фуллера, глина Аттапульгуса, пороцелевая глина, бокситы, кремнезем или их смеси. Эффективным адсорбентом для проведения перколяционной доочистки гидрокрекинговых базовых масел является активированная соляной кислотой гранулированная бентонитовая глина [7]. Использование в качестве адсорбента активированной глины позволяет получать продукт, представляющий собой бесцветную прозрачную маслянистую жидкость, не флуоресцирующую при дневном свете за счет эффективного удаления из депарафинизированного остаточного продукта процесса «Юникрекинг» полициклических ароматических углеводородов и смол.

К недостаткам использования адсорбционного метода очистки масел относится ограниченность сорбционной емкости активированной глины, что свидетельствует о необходимости проведения ее периодической регенерации. Наиболее эффективным десорбентом, позволяющим осуществлять регенерацию отработанной активированной глины, выступает смесь ароматических углеводородов с одноатомными алифатическими спиртами [7]. Однако, как показали исследования, применение сольвентного способа регене-

рации отработанной активной глины позволяет провести не более трех циклов адсорбции. Затем необходимо подвергнуть отработанную глину окислительной регенерации путем выжигания накапливающегося на ее поверхности нерастворимого в сольвенте адсорбата или использовать свежую глину.

Целью исследования является изучение изменения свойств активной глины в процессе адсорбционной очистки гидрокрекингового масла и после проведения окислительной регенерации отработанной глины.

Основная часть. В качестве объектов исследования использованы следующие:

1. Активированная соляной кислотой гранулированная монтмориллонитовая глина, прокаленная в муфельной печи при температуре $(550 \pm 10)^\circ\text{C}$ в течение 2 ч (далее – исходная глина). Гранулометрический состав исходной глины (в процентах массовых): размер частиц менее 0,25 мм – 1,86; от 0,25 до 0,5 мм – 35,81; от 0,5 до 1,0 мм – 27,18; от 1,0 до 1,25 мм – 35,15.

2. Глина после проведения адсорбционной доочистки депарафинизированного селективными растворителями остаточного продукта процесса гидрокрекинга вакуумных газойлей по технологии «Юникрекинг» (далее – отработанная глина). Отработанная глина перед проведением испытаний была промыта гексаном для удаления остатков масла и просушена при температуре $(105 \pm 1)^\circ\text{C}$ до постоянной массы.

3. Регенерированная глина, полученная путем прокали образца отработанной глины в муфельной печи в воздушной среде при температуре $(550 \pm 10)^\circ\text{C}$ в течение 2 ч (далее – регенерированная глина). Потеря массы отработанной глины при проведении окислительной регенерации составила 15,98% мас.

Адсорбционной очистке подвергался депарафинизированный остаточный продукт установки гидрокрекинга ОАО «Нафтан» с кислотным числом 0,89 мг KOH/г [8] и цветом 1,5 ед. по шкале ASTM [9]. Сырьем установки гидрокрекинга являлись вакуумные газойли, выделенные из смеси Западно-Сибирских нефтей марки Urals. Процесс адсорбционной очистки проводился при температуре $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ и объемном расходе продукта $0,5 \text{ ч}^{-1}$. В результате адсорбционной очистки был получен бесцветный прозрачный продукт с кислотным числом 0,10 мг KOH/г.

Изучение свойств исходной глины осуществлялось при помощи анализатора площади поверхности и распределения пор BELSORP MAX. В качестве адсорбтива использовался азот. Предварительная подготовка образцов выполнялась путем их дегезации и термостатирования под вакуумом в измерительной бюретке прибора при температуре 180°C в течение часа.

В качестве продувочного газа использовался гелий. Изотермы адсорбции и десорбции азота исходной, отработанной и регенерированной глиной представлены на рис. 1.

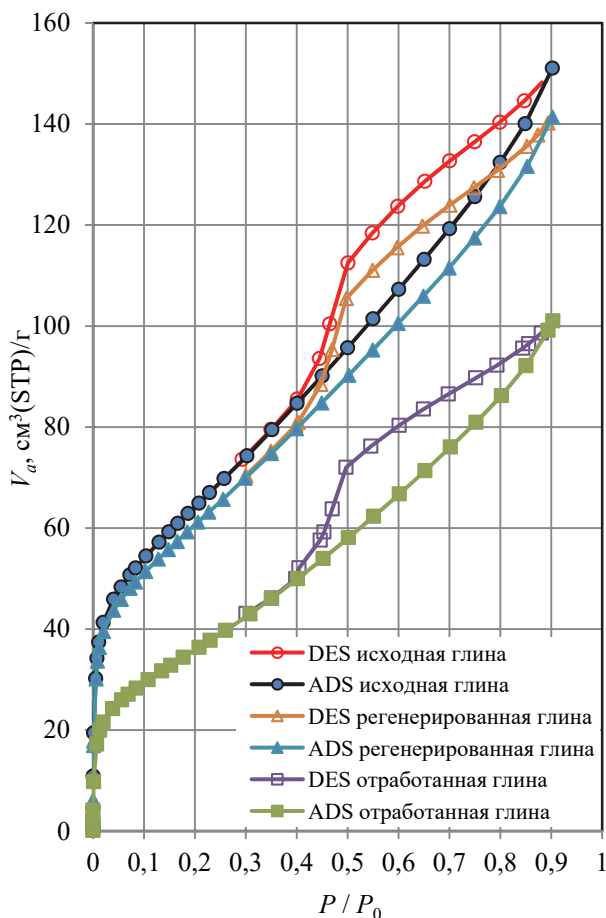


Рис. 1. Изотермы адсорбции (ADS) и десорбции (DES) азота (при температуре 77 К) исходной, отработанной и регенерированной глины

Величина V_a , cm^3 (STP)/г, равна количеству адсорбированного газа – азота, выраженного как объем газа при стандартных условиях (Standard Temperature and Pressure: 273,15 К, 101,3 кПа) на 1 г адсорбента.

Согласно классификации IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), изотерма адсорбции / десорбции азота относится к типу *Ib* с петлей гистерезиса типа *H3*. Как правило, изотермы типа *Ib* при адсорбции азота дают адсорбенты, содержащие агрегаты пластинчатых частиц, формирующие мезопоры щелевидной формы. Представленная на рис. 1 изотерма адсорбции / десорбции азота исходной глиной имеет форму, аналогичную изотерме адсорбции / десорбции природного монтмориллонита, полученной Баррером и Маклаудом (1958) [10].

О присутствии в исследуемых образцах глины мезопор, т. е. пор по классификации IUPAC с диа-

метром от 2 до 50 нм, свидетельствует наличие на изотермах петли капиллярно-конденсационного гистерезиса типа *H3*. Адсорбции соответствует нижняя кривая, а десорбции – верхняя. При давлении ниже 40 кПа капиллярная конденсация азота в исследуемых образцах глины не происходит. Обработка изотерм адсорбции / десорбции исследуемых образцов проводилась при помощи аналитического программного обеспечения BELMaster™ компании MicrotracBEL Corp. (Япония) с использованием методов Ленгмюра и ВЕТ. Уравнения мономолекулярной адсорбции Ленгмюра (1) и полимолекулярной адсорбции ВЕТ (2) имеют следующий вид:

$$A = A_{\infty} \cdot \frac{B \cdot P}{1 + B \cdot P}; \quad (1)$$

$$A = \frac{A_{\infty} \cdot C \cdot \frac{P}{P_S}}{\left(1 - \frac{P}{P_S}\right) \cdot \left[1 + (C - 1) \cdot \frac{P}{P_S}\right]}, \quad (2)$$

где A_{∞} – емкость монослоя, моль/г; B – константа уравнения Ленгмюра; C – константа уравнения ВЕТ; P – равновесное давление паров адсорбата над поверхностью адсорбента, Па; P_S – давление насыщенных паров над поверхностью чистого жидкого адсорбата, Па.

Истинная плотность образцов также определялась с помощью анализатора BELSORP MAX при температуре 40°C путем измерения объема образца как разницы между объемами пустой бюретки и бюретки с навеской образца после откачки из бюретки воздуха, с последующим делением полученного объема на массу навески. Свойства образцов исходной, отработанной и регенерированной глины представлены в таблице.

Анализ полученных результатов показал, что истинная плотность отработанной глины на 418,91 kg/m^3 ниже, чем плотность исходной глины. Это объясняется наличием на ее поверхности и в порах адсорбата. Плотность компонентов, входящих в состав адсорбата, которые удалось выделить методом экстрактивной регенерации с использованием бинарного растворителя метилэтилкетон / бензол при 20°C, равна 862,1 kg/m^3 , что на 18,8 kg/m^3 выше, чем у очищаемого масла. Выделенный компонент адсорбата представляет собой продукт черного цвета, состоящий из ароматических углеводородов, смол, а также продуктов их конденсации. Однако при использовании метода сольвентной регенерации отработанной глины часть адсорбата в количестве (7,0 ± 0,5)% мас. остается на поверхности и в порах глины. Истинная плотность глины, регенерированной окислительным методом, ниже плотности исходной глины на 1,06 kg/m^3 , т. е. глубина регенерации по данному показателю составила более 99,95%.

Свойства образцов глины

Показатель	Значение для глины		
	исходная	отработанная	регенерированная
Истинная плотность, кг/м ³	2568,58	2149,67	2567,52
Удельная площадь поверхности по методу Ленгмюра, м ² /г (в диапазоне давлений от 0,001 до 15 кПа)	243,54	146,00	243,40
Константа <i>B</i> в уравнении Ленгмюра	2,5435	0,9205	2,6589
Коэффициент корреляции (метод Ленгмюра)	0,9969	0,9955	0,9962
Удельная площадь поверхности по методу ВЕТ, м ² /г	229,52	132,85	217,92
Общий объем пор по методу ВЕТ, см ³ /г	0,2336	0,1562	0,2220
Средний размер пор по методу ВЕТ, нм	4,1	4,7	4,1
Константа <i>C</i> в уравнении ВЕТ	122,55	62,19	483,48
Коэффициент корреляции (метод ВЕТ)	0,9999	0,9998	0,9995
Удельная площадь поверхности мезопор по методу INNES, м ² /г	123,04	88,524	114,69
Общий объем мезопор по методу INNES, см ³ /г	0,1800	0,1318	0,1676

Удельная поверхность отработанной глины по методу Ленгмюра, в основе которого лежит теория мономолекулярной адсорбции, ниже, чем у исходной глины на 97,54 м²/г, т. е. снижается на 40,05%. Отношение констант скоростей адсорбции и десорбции, являющееся константой адсорбированного равновесия в уравнении Ленгмюра и характеризующее прочность связи молекул адсорбируемого вещества с поверхностью адсорбента, у регенерированной глины выше, чем у исходной. При этом в ходе адсорбционной очистки гидрокрекингвого масла величина данной константы снижается.

Аналогичные закономерности получены и при анализе изотерм адсорбции / десорбции азота по методу ВЕТ (Brunauer – Emmett – Teller) [11]. Константа *C* в уравнении ВЕТ у отработанной глины по отношению к исходной глине снижается примерно в 2 раза, а у регенерированной глины увеличивается в 4 раза. Полученные результаты можно объяснить изменением полярности поверхности глины и склонностью к поляризации молекул жидкого азота [12]. В процессе адсорбционной очистки гидрокрекингвого масла на поверхности глины формируется

адсорбционный слой из содержащихся в масле смол, молекулы которых ориентированы полярными группами к поверхности глины, а неполярными углеводородными фрагментами наружу. В результате полярность поверхности отработанной глины уменьшается по сравнению с исходной глиной. При этом наблюдается уменьшение общего объема содержащихся в глине пор по методу ВЕТ на 0,0774 см³/г, или на 33,1%, и ее удельной площади поверхности на 96,67 м²/г, или 42,1%. Также увеличивается средний размер пор на 0,6 нм, или на 15,5%.

В ходе окислительной регенерации отработанной глины происходит неполное удаление адсорбата. Степень восстановления объема пор и удельной площади поверхности глины составила около 95%. Таким образом, увеличение константы *C* в уравнении ВЕТ для образца регенерированной глины, вероятно, связано с образованием при проведении окислительной регенерации отработанной глины соединений, обладающих высокой полярностью. Учитывая условия проведения регенерации отработанной глины и состав адсорбата можно предположить, что образующиеся на поверхности глины соединения представляют собой продукты окислительной конденсации смол.

Анализ распределения пор по размерам в исследуемых образцах глины проводился с использованием метода INNES. В основе данного метода лежит модель параллельных пластин, позволяющая оценить распределение мезопор щелевидной формы по изотерме десорбции азота глинистым материалом [13, 14]. Кривые дифференциального распределения объема мезопор по размерам в образцах глины приведены на рис. 2.

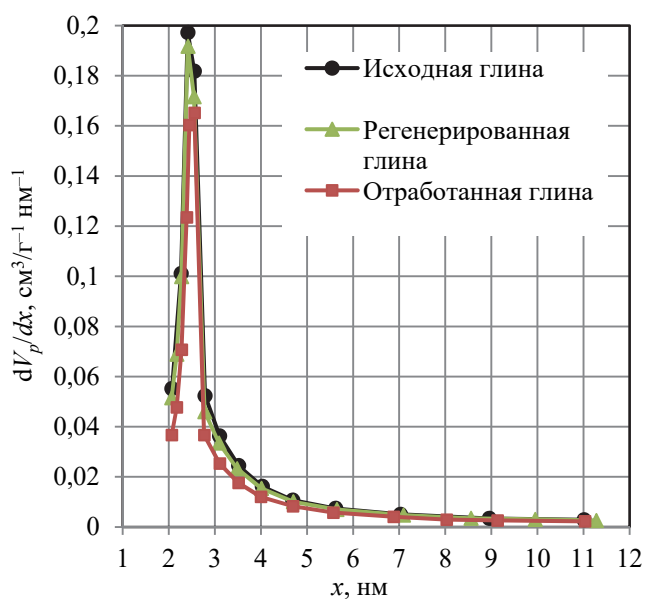


Рис. 2. Распределение объема мезопор по размерам в исследуемых образцах глины по методу INNES

Общий объем мезопор по методу INNES в отработанной глине по сравнению с исходной глиной снижается на $0,0482 \text{ см}^3/\text{г}$, или на 26,8%. При окислительной регенерации отработанной глины объем пор увеличивается. Однако в порах глины остается до $0,0124 \text{ см}^3/\text{г}$ адсорбата. Удельная площадь поверхности мезопор, определенная по методу INNES, в регенерированной глине на $8,35 \text{ м}^2/\text{г}$, или 6,8%, ниже, чем в исходной глине. Сравнительный анализ графиков изменения дифференциального распределения объема пор по размерам показал, что в отработанной глине по сравнению с исходной наиболее существенное уменьшение объема наблюдается у пор шириной менее 5,6 нм.

Изменение очищающей способности исходной глины после окислительной регенерации отработанной глины оценивалось по глубине удаления смол из масла в зависимости от объемного отношения очищаемого масла к глине (рис. 3).

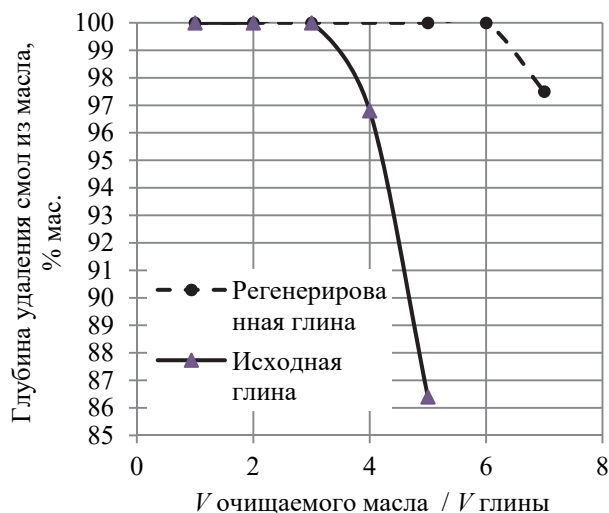


Рис. 3. Изменение глубины удаления смол из масла с увеличением объемного отношения очищаемого масла к глине

Очевидно, что с увеличением объема очищаемого масла, пропущенного через слой глины, глубина удаления из него смол снижается. Однако поглотительная способность регенериро-

ванной глины по отношению к смолам оказалась выше, чем у исходной глины почти в 2 раза.

Вероятно, это связано с изменением поляризующей способности поверхности регенерированной глины. В работе [15] предложена модель для активированного кислотой монтмориллонита, включающая в себя активные центры как гидролитической, так и обменной формы кислотности. При этом утверждается, что за отбеливающие и каталитические свойства активированной кислотами монтмориллонитовой глины отвечает атом водорода, находящийся в обменном положении у атома алюминия. Исследования показали, что кислотное число водной суспензии отработанной глины составляет $37,40 \text{ мг КОН}/\text{г}$. В процессе окислительной регенерации оно снижается до $6,59 \text{ мг КОН}/\text{г}$, но остается выше, чем у исходной глины, кислотное число которой равно $3,07 \text{ мг КОН}/\text{г}$. Вероятно, в процессе регенерации отработанной глины происходит дополнительное протонирование ее поверхности и увеличение обменной кислотности, что и способствует увеличению поляризующей способности ее поверхности.

Заключение. Результаты изучения изменения свойств активной глины продемонстрировали, что в ходе адсорбционной доочистки гидрокрекингвого масла наблюдается уменьшение объема пор и удельной поверхности активной глины. При этом снижается прочность связи молекул адсорбируемых веществ с поверхностью глины и уменьшается ее полярность.

Анализ изменения свойств активной глины при регенерации показал, что эффективность адсорбента, используемого в процессе адсорбционной доочистки гидрокрекингвого масла, определяется главным образом полярностью его поверхности. Чем выше полярность поверхности адсорбента, тем больше ее сорбционная емкость по отношению к удаляемым из очищаемого масла смолам. Поглотительная способность регенерированной окислительным методом глины по отношению к смолам выше, чем у исходной глины, что, вероятно, связано с более высокой обменной кислотностью регенерированной глины.

Список литературы

1. Petro-Canada Lubricants Handbook 2017. Industry-leading products for improved business performance. Petro-Canada Lubricants Inc. Mississauga, Ontario, Canada. 2017. P. 228.
2. Фамутдинов Р. Н., Дезорцев С. В. Определение качества сырья для высокоиндексных масел из остатка гидрокрекинга // Башкирский химический журнал. 2013. Т. 20, № 4. С. 37–39.
3. Свойства и перспективные направления переработки остаточного продукта процесса «Юникрекинг» / А. А. Ермак [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. 2015. № 11. С. 115–120.
4. Гришин П. Ф., Ермак А. А. Окислительная стабильность гидрокрекингговых базовых масел и способы ее повышения // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. 2021. № 3. С. 80–85.

5. Гуреев А. А., Фукс И. Г., Лашхи В. Л. Химмотология. М.: Химия, 1986. 368 с.
6. Richard L. Coleman, Billy H. Cummins, William B. Ashton. Production of oils stable to ultra-violet light. Patent US 3684684, 1972.
7. Ермак А. А., Гришин П. Ф., Артеменок Н. А. Перспективы применения активированной глины для доочистки остаточного продукта процесса «Юникрекинг» // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. 2019. № 3. С. 111–117.
8. Нефтепродукты. Метод определения кислотности и кислотного числа: ГОСТ 5985–2022. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 14 с.
9. Нефтепродукты. Метод определения цвета по шкале ASTM: СТБ 1796-2007. Минск: БелГИСС, 2008. 16 с.
10. Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K. Adsorption by Powders and Porous Solids Principles, Methodology and Applications // Academic Press. 1998. 465 p.
11. Brunauer S., Emmett P. H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers // Journal of the American Chemical Society. 1938. Vol. 60, issue 2. P. 309–319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
12. Ely Ja. F., Straty G. C. Dielectric constants and molar polarizabilities of saturated and compressed fluid nitrogen // Journal of Chemical Physics. 1974. Vol. 61, no. 4. P. 1480–1485. <https://doi.org/10.1063/1.1682076>.
13. BELMaster. Analysis Software. User's Manual. Ver. 3.2.1. MicrotracBEL Corp., 2020. 227 p.
14. Innes W. B. Use of a Parallel Plate Model in Calculation of Pore Size Distribution // Analytical Chemistry, 1957. Vol. 29, no. 7. P. 1069–1073. <https://doi.org/10.1021/ac60127a027>.
15. Зульфугаров З. Г. Исследование физико-химических свойств и отбеливающей способности глин месторождений Азербайджанской ССР и Гумбрина. Баку: Изд-во Акад. наук АзССР, 1957. 248 с.

References

1. Petro-Canada Lubricants Handbook 2017. *Industry-leading products for improved business performance*. Petro-Canada Lubricants Inc. Mississauga, Ontario, Canada. 2017. P. 228.
2. Famutdinov R. N., Desortsev S. V. Determination of the quality of raw materials for high-index oils from the residue of hydrocracking. *Bashkirskiy khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2013, vol. 20, no. 4, pp. 37–39 (In Russian).
3. Yermak A. A., Pokrovskaya S. V., Buraya I. V., Syubareva E. V., Zavadskiy A. V. Properties and promising directions of processing the residual product of the “Unicreaking” process. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Polotsk State University], series B, Industry. Applied sciences, 2015, no. 11, pp. 115–120 (In Russian).
4. Grishin P. F., Yermak A. A. Oxidative stability of hydrocracking base oils and ways to increase it. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Polotsk State University], series B, Industry. Applied sciences, 2021, no. 3, pp. 80–85 (In Russian).
5. Gureev A. A., Fuchs I. G., Lashkhy V. L. *Khimmotologiya* [Chemmotology]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 368 p. (In Russian).
6. Richard L. Coleman, Billy H. Cummins, William B. Ashton. Production of oils stable to ultra-violet light. Patent US 3684684, 1972.
7. Yermak A. A., Grishin P. F., Artemenok N. A. Prospects of using activated clay for post-treatment of the residual product of the Unicreaking process. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Polotsk State University], series B, Industry. Applied sciences, 2019, no. 3, pp. 111–117 (In Russian).
8. GOST 5985–2022. Petroleum products. Method for determining acidity and acid number. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2023. 14 p. (In Russian).
9. СТБ 1796–2007. Petroleum products. The method of determining the color according to the ASTM scale. Minsk, BelGISS Publ., 2008. 16 p. (In Russian).
10. Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K. Adsorption by Powders and Porous Solids Principles, Methodology and Applications. *Academic Press*, 1998. 465 p.
11. Brunauer S., Emmett P. H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 1938, vol. 60, issue 2, pp. 309–319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
12. Ely Ja. F., Straty G. C. Dielectric constants and molar polarizabilities of saturated and compressed fluid nitrogen. *Journal of Chemical Physics*, 1974, vol. 61, no. 4, pp. 1480–1485. <https://doi.org/10.1063/1.1682076>.
13. BELMaster. *Analysis Software*. User's Manual. Ver. 3.2.1. MicrotracBEL Corp., 2020. 227 p.

14. Innes W.B. Use of a Parallel Plate Model in Calculation of Pore Size Distribution. *Analytical Chemistry*, 1957, vol. 29, no. 7, pp. 1069–1073. <https://doi.org/10.1021/ac60127a027>.

15. Zulfugarov Z. G. *Issledovaniye fiziko-khimicheskikh svoystv i otbelivayushchey sposobnosti glin mestorozhdeniy Azerbaydzanskoj SSR i Gumbrina* [Investigation of the physico-chemical properties and bleaching ability of clays from the deposits of the Azerbaijan SSR and Humbrin]. Baku, Akademiya nauk AZSSR Publ., 1957. 248 p. (In Russian).

Информация об авторах

Гришин Павел Федорович – старший преподаватель кафедры технологии и оборудования переработки нефти и газа. Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, Республика Беларусь). E-mail: p.grishin@psu.by

Ермак Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования переработки нефти и газа. Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой (211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, Республика Беларусь). E-mail: a.ermak@psu.by

Information about the authors

Hryshyn Pavel Fedorovich – Senior Lecturer, the Department of Technology and Equipment of Oil and Gas Processing. Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (29, Blokhina str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: p.grishin@psu.by

Yermak Alexander Aleksandrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Technology and Equipment of Oil and Gas Processing. Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk (29, Blokhina str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: a.ermak@psu.by

Поступила 09.11.2023