

УДК 665.637.88

ПОЛУЧЕНИЕ ТОВАРНОГО БИТУМА ОКИСЛЕНИЕМ ГУДРОНА В ПРИСУТСТВИИ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО КАТАЛИЗАТОРА

© 2025 г. В. М. Аббасов¹, Л. М. Эфендиева¹, Ю. П. Черепнова^{1,*}, Г. Г. Насибова¹,
Н. М. Алиева¹, С. Ф. Ахмедбекова¹, А. М. Мамедов^{1,3}, А. С. Лядов^{2,**}

¹ Институт нефтехимических процессов им. акад. Ю.Г. Мамедалиева
Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, Баку, AZ1025, Азербайджан

² Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, 119991, Россия

³ Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, AZ5008, Азербайджан

E-mail: * uta1980@inbox.ru, ** lyadov@ips.ac.ru

Поступила в редакцию 10.02.2025

После доработки 27.03.2025

Принята к публикации 01.04.2025

В работе изучено влияние введения растворимого в сырье катализатора на основе железосодержащих солей нефтяных кислот на процесс окисления нефтяного гудрона с целью получения битума товарного качества. Установлено, что введение катализатора в нефтяное сырье позволяет с большей эффективностью (скорость окисления увеличивается более чем в 2 раза) получать битум, характеризующийся высокой термической стабильностью и большими значениями дуктильности (более 100 см) по сравнению с битумом, полученным некаталитическим окислением. Методом ИК-спектроскопии показано изменение структурно-группового состава гудрона в процессе окисления, приводящее к повышению ароматичности и образованию полизамещенных ароматических структур в окисленном продукте. Потенциал промышленного внедрения процесса каталитического окисления гудрона на нефтеперерабатывающих заводах обусловлен сокращением времени, необходимого для окисления, и получением более качественного товарного продукта. Такой подход может быть рекомендован в качестве наилучшей доступной технологии для снижения антропогенного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: нефтяной гудрон; железосодержащий катализатор; жидкофазное окисление; битум; термический анализ; дуктильность

DOI: 10.56304/S2414215825010071; EDN: WXTCDL

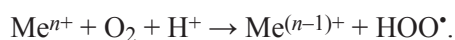
В связи с растущим потреблением нефти и нефтепродуктов и постепенным истощением ранее разведанных нефтяных месторождений, тяжелые нефтяные остатки становятся все более востребованным сырьем для получения товарных продуктов. Важный способ переработки тяжелых нефтяных остатков — их окисление с целью получения дорожно-строительных материалов, а именно — нефтяных битумов различных марок [1, 2].

Традиционно гудрон на нефтеперерабатывающих заводах окисляют до битума путем продувки воздуха в окислительных аппаратах различного типа без использования каталитических систем при температуре 220–270°C и расходе воздуха 50–400 нм³/т битума. В зависимости от свойств сырья и требуемого качества получаемых битумов необходима различная длительность осуществления процес-

са. Для получения высокоплавких строительных и кровельных битумов с температурой размягчения 80–120°C требуется от 10 до 18 ч, а для дорожных битумов — 4–8 ч.

Совершенствование традиционных способов окисления нефтяных остатков с целью повышения качества получаемых битумов осуществляется за счет введения в окислительный процесс различных модифицирующих добавок [3, 4]. Добавки делятся на две основные группы. К первой группе относят вещества, проявляющие каталитические свойства в процессе окисления, а именно соединения (соли минеральных и/или органических кислот) различных металлов (Zn, Sn, Al, Fe, Co) [5]. Введение катализаторов позволяет снизить длительность процесса окисления при сохранении качества получаемых товарных продуктов, что, в свою очередь, благопри-

ятно сказывается на экономической эффективности процесса. Каталитическое действие солей металлов переменной валентности обусловлено образованием свободных радикалов, в результате их окислительно-восстановительных превращений [6]:



Ко второй группе относят модификаторы, воздействующие на саму структуру компонентов нефтяной дисперсной системы за счет регулирования фазовых переходов и изменения молекулярно-дисперсного состояния исходной нефтяной системы. К этой группе можно отнести вещества, которые близки к компонентам нефтяной системы по структуре или составу, — модификаторы с высоким содержанием ароматических структур (нефтепродукты, смолы) или углерода (асфальтеносодержащие продукты, отходы шинной промышленности и др.) [7].

В настоящее время в качестве перспективных каталитических систем для процесса окисления гудрона рассматривают соединения железа [8]. Получение дорожного битума в процессе аэробного окисления в присутствии железосодержащих катализаторов привлекает внимание исследователей из-за доступности и невысокой стоимости катализаторов, а также возможности повышения качества товарных битумов на уже существующих установках без значительных капитальных затрат [9, 10]. В работах [11, 12] в качестве железосодержащих катализаторов окисления гудрона использовали хлорид и стеарат железа(III). Введение в гудрон 2.0 мас.% хлорида Fe(III) позволяет сократить время окисления в 1.7 раза, стеарат Fe(III) менее активный катализатор и такое же сокращение времени окисления достигается при концентрации катализатора 3.0 мас.%.

Использование катализаторов при окислении битумов позволяет получать товарные продукты с улучшенными структурными и функциональными свойствами, что обуславливает актуальность проведения исследований с целью поиска оптимальных модификаторов-катализаторов, позволяющих получать экономически обоснованным способом высококачественные дорожные материалы.

Цель работы — изучение особенностей жидкофазного окисления нефтяного гудрона в присутствии катализатора на основе железосодержащей соли природных нефтяных кислот, оказывающего воздействие на структурную организацию исходной нефтяной системы и качественные показатели получаемых битумов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве субстрата при исследовании процесса окисления использовали нефтяной гудрон, получаемый на Нефтеперерабатывающем заводе им. Г. Алиева (Азербайджан) в процессе первичной переработки нефти. Физико-химические показатели качества гудрона представлены в табл. 1.

В качестве катализатора в работе использовали железосодержащую соль природных нефтяных кислот (нафтенат железа), которую синтезировали следующим образом: в колбу загружали расчетные количества гексана (99%, Sigma Aldrich) и природных нефтяных кислот, выделенных из светлых дистиллятов смеси бакинских нефтей в массовом соотношении 5 : 1 и нагревали при постоянном перемешивании до 40°C, затем, по каплям добавляли 20%-ный раствор NaOH (90%, Sigma Aldrich) в количестве, соответствующем кислотному числу нафтена. После добавления раствора щелочи, смесь перемешивали при той же температуре в течение 1 ч и затем к реакционной смеси добавляли FeSO₄·7H₂O (99%, Sigma Aldrich) в стехиометрическом количестве и оставляли перемешиваться еще в течение 3 ч. После окончания реакции, смесь разделяли с помощью делительной воронки. Водную фазу с нижней части воронки удаляли, а раствор соли с растворителем в органической фазе промывали водой, нагретой до 50–60°C для удаления неорганических анионов [13, 14].

Процесс окисления нефтяного гудрона осуществляли в присутствии нафтена железа (концентрация 0.1–0.5 мас.%) на установке барботажного типа при температуре (260 ± 2)°C и скорости подачи воздуха 0.5 л/мин и 0.6 л/мин на 100 г сырья. Выбор температуры обусловлен температурой окисления

Таблица 1. Характеристика используемого в работе нефтяного гудрона

Показатель	Значение
Плотность при 20°C, г/см ³	0.9655
Температура н.к., °C	Не ниже 450
Групповой состав, мас.%	
асфальтены	16.6
смолы	18.8
масла	64.6
Температура размягчения по КиШ, °C	28.5
Температура вспышки в открытом тигле, °C	>286
Коксуемость, мас.%	11.48
Содержание серы, мас.%	0.48

гудрона на промышленных установках. Отбор проб окисленного продукта осуществляли каждые 3–5 ч и измеряли температуру размягчения по методу «Кольцо и Шар» (КиШ) получаемого битума. После окончания процесса окисления при достижении значения по КиШ 46–49°C, полученные образцы оценивали на соответствие ГОСТ AZ 3536601.242-2015 по следующим показателям качества: температура размягчения, пенетрация при 25°C, температура хрупкости, дуктильность при 25°C, адгезия к минеральным наполнителям.

При температуре 260°C и небольшой скорости подачи воздуха, несмотря на протекание множества химических превращений, процесс окисления описывается как реакция первого порядка, однако на практике требуется корректировка констант скорости. Принимая возросшую температуру размягчения окисленного битума за критерий завершения процесса и считая концентрацию реагирующего вещества обратно пропорциональной температуре размягчения, суммарную константу скорости окисления гудрона рассчитывали по следующей формуле [15]:

$$K = \frac{1}{\tau} \ln \frac{t_p^{\tau}}{t_p^0}, \quad (1)$$

где K — константа скорости; τ — продолжительность окисления, ч; t_p^{τ} — температура размягчения окисленного сырья при продолжительности окисления τ , °C; t_p^0 — температура размягчения исходного сырья, °C.

Действие нафтената железа на скорость процесса окисления оценивали с помощью показателя эффекта процесса:

$$\Xi = \frac{K}{K_0}, \quad (2)$$

где K_0 — константа скорости окисления гудрона без добавки катализатора-модификатора, ч^{–1}; K — константа скорости окисления гудрона с добавкой катализатора-модификатора, ч^{–1}.

На основании формул (1) и (2) были рассчитаны константы скорости окисления гудрона в присутствии нафтената железа и эффект процесса в зависимости от продолжительности окисления.

ИК-спектры регистрировали на Фурье-спектрометре ALPNA (Bruker, Германия), оснащенном приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с алмазной призмой в диапазоне 4000–400 см^{–1}. Спектры ЯМР ¹H регистрировали на спектрометре MAGRITEK (Германия) при частоте 61.74 МГц. В качестве растворителя использовали дейтерированный ацетон.

Термические свойства исходного нефтяного гудрона и полученных образцов битума исследованы методом термографического анализа. Исследования проводили на синхронном термоанализаторе Jupiter STA 449F3 (NETZSCH, Германия) в динамическом режиме, в инертной (азотной) среде при диапазоне температур 25–650°C, со скоростью повышения температуры 10°C/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 представлены основные результаты, полученные при окислении гудрона в присутствии нафтената железа.

Как и следовало ожидать, использование катализатора приводит к увеличению скорости окисления нефтяного гудрона, что характеризуется ростом константы скорости с увеличением концентрации нафтената железа. Установлено, что скорость подачи окислителя оказывает значительное влияние на интенсивность протекания процесса, как в присутствии катализатора, так и без него. Введение катализатора в процесс окисления нефтяного гудрона в количестве 0.1 и 0.3 мас.% обеспечивает сокращение продолжительности реакции окисления практически в два раза при скоростях подачи воздуха 0.5 л/мин и 0.6 л/мин соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации катализатора приводит к заметному снижению эффективности процесса, что обусловлено ингибирующими свойствами нафтената железа при более высокой концентрации за счет возрастающей роли реакций обрыва цепи в процессе жидкофазного окисления.

Использование катализатора способствует и улучшению качества получаемого битума, что, например, выражается в повышении дуктильности, которая, в свою очередь, отражает стойкость к механическим воздействиям и эластичность строительного материала. Битум, полученный в присутствии 0.3 мас.% нафтената железа, скорости подачи воздуха — 0.6 л/мин и продолжительности окисления 8 ч, по своим качественным характеристикам соответствует всем требованиям стандарта EN 12591 для дорожного битума марки БНД 50/70.

Для нефтяного гудрона и битума, окисленного в присутствии 0.3 мас.% нафтената железа, были записаны ¹H ЯМР-спектры, являющиеся практически идентичными. ¹H ЯМР спектр нефтяного гудрона, δ , ppm: 0.69–1.02 (CH₃), 1.02–1.57 (CH₂), 1.57–2.14 (нафтеновые кольца), 2.14–3.50 (CH, CH₂ в α -положении относительно ароматических колец), 6.5–8.80 (атомы водорода в ароматическом кольце). ¹H ЯМР-спектр окисленного битума, δ , ppm: 0.63–1.00 (CH₃), 1.00–1.50 (CH₂), 1.50–2.10 (нафтеновые кольца),

Таблица 2. Кинетические показатели окисления гудрона в присутствии нафтената железа и свойства получаемых битумов

Показатель	Скорость подачи воздуха 0.5 л/мин				Скорость подачи воздуха 0.6 л/мин				Битум марки БНД 50/70 (ГОСТ AZ3536601.242-2015)
	нафтенат железа				нафтенат железа				
Количество катализатора, мас.%	0	0.1	0.3	0.5	0	0.1	0.3	0.5	
Кинетические показатели									
Время окисления до достиже- ния температуры размягчения по КиШ, равной 46–49°С, ч	25	19	11	29	15	10	8	29	
Константа скорости, $K, \text{ч}^{-1} \cdot 10^2$	1.9	2.85	4.5	1.84	3.1	5.0	6.5	1.3	
Эффект процесса, K/K_0		1.5	2.5	0.9		1.6	2.1	0.4	
Показатели качества окисленного продукта									
Температура размягчения, °С	46	49	47	49	46	47	48	43	46–54
Пенетрация при 25°С, 0.1 мм	54	51	54	33	56	54	52	–	51–70
Температура хрупкости, °С	–25	–23	–20	–25	–23	–21	–22	–	–15
Дуктильность при 25°С, см	87	80	>100	75	91	96	>100	–	>55

2.10–3.30 (СН, СН₂ в α -положении относительно ароматических колец), 6.40–8.30 (атомы водорода в ароматическом кольце).

Методом ИК-спектроскопии, в соответствии методикой, описанной в [16], был проанализирован структурно-групповой состав полученных образцов битумов при одинаковом оптимальном количестве катализатора (0.3 мас.%), но при разных скоростях подачи воздуха (0.5, 0.6 л/мин). Результаты анализа ИК-спектров представлены в табл. 3.

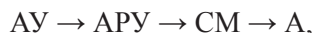
Согласно приведенным в табл. 3 спектральным коэффициентам, в усредненной молекуле битума, полученном из гудрона в присутствии нафтенат железа, увеличивается содержание СН₃-групп, что обусловлено образованием полизамещенных ароматических углеводородов и углеводородов с разветвленными парафиновыми группами, способствующим увеличению содержания ароматических структур в усредненной макромолекуле битума. Изменение физических свойств гудронов в процессе окисления

Таблица 3. Сравнение структурно-группового состава битумов, полученных при окислении гудрона

Показатель	Скорость подачи воздуха 0.5 л/мин		Скорость подачи воздуха 0.6 л/мин	
	без катализатора	в присутствии катализатора (0.3 мас.%)	без катализатора	в присутствии катализатора (0.3 мас.%)
$\Pi = D_{721}/D_{1458}$	0.3796	0.3676	0.3759	0.3676
$\text{H} = D_{965}/D_{1465}$	0.0729	0.0735	0.0676	0.0800
$\text{A} = D_{1602}/D_{1465}$	0.5192	0.5200	0.4800	0.5200
$\text{A}_1 = D_{1602}/D_{1458}$	0.1871	0.1914	0.1805	0.1912
$\text{O} = D_{1700}/D_{1465}$	0.1140	0.1176	0.1053	0.1103
$\text{P} = D_{1376}/D_{1458}$	0.5985	0.6029	0.5940	0.6056

$\Pi = D_{721}/D_{1458}$ — условное содержание парафиновых структур; $\text{H} = D_{965}/D_{1465}$ — условное содержание нафтенных структур; $\text{A} = D_{1602}/D_{1465}$ — условное содержание ароматических структур; $\text{A}_1 = D_{1602}/D_{1458}$ — ароматичность; $\text{O} = D_{1700}/D_{1465}$ — окисленность; $\text{P} = D_{1376}/D_{1458}$ — степень разветвления.

связано с трансформацией группового состава и увеличением доли асфальтенов в получаемом битуме в соответствии со схемой:



где АУ, АРУ, СМ и А — алифатические углеводороды, ароматические углеводороды, смолы и асфальтены соответственно. Полученные результаты хорошо согласуются с представленной схемой, а именно повышается степень ароматичности и увеличивается полярность продукта, что свидетельствует о повышении в продукте доли асфальтенов в товарном продукте. Наблюдаемый характер изменения структурных фрагментов свидетельствует о том, что окисление нефтяного гудрона в присутствии нафтената железа оказывает положительное влияние на адгезионные свойства окисленных битумов по отношению к минеральным наполнителям.

Изучена термическая устойчивость исходного гудрона и полученного окисленного битума при оптимальных условиях (рис. 1), в табл. 4 приведены данные по изменению массы образцов в зависимости от температуры.

Во всем исследуемом температурном диапазоне термическая устойчивость битума, полученного в присутствии катализатора заметно выше чем у исходного гудрона, что выражается в меньшей потере массы. Особо обращает на себя внимание то, что термическая стабильность битума, полученного при некаталитическом окислении гудрона существенно ниже чем у исходного гудрона и битума, полученного окислением в присутствии катализатора. Данный битум начинает подвергаться превращениям уже при температуре около 100°C и во всем исследуемом температурном диапазоне характеризуется большими значениями потери массы.

В ходе проводимого исследования было установлено, что введение в сырьевой поток гудрона растворимого в нем нафтената железа, позволяет значительно (более чем в 2 раза) увеличить эффективность процесса окисления при получении битумов строительного назначения, которая заключалась

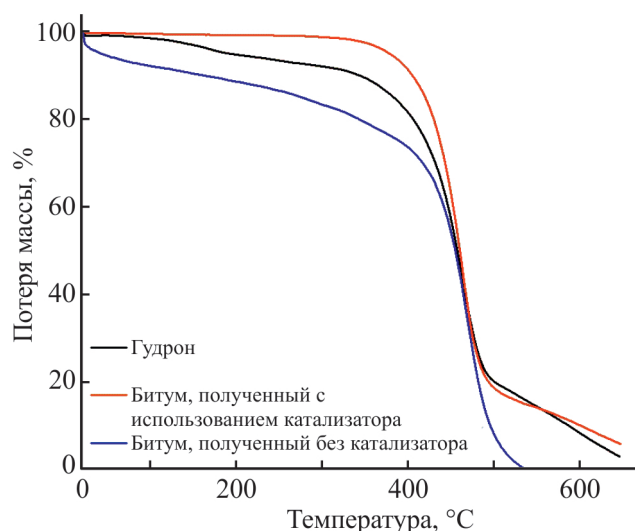


Рис. 1. Термограммы исходного нефтяного гудрона, а также битума, полученного без катализатора, и битума, полученного при окислении исходного гудрона в присутствии катализатора (скорость подачи воздуха — 0.6 л/мин; концентрация нафтената железа — 0.3 мас. %).

в снижении времени необходимого для окисления и получении окисленного продукта (битума) с лучшими физико-химическими и эксплуатационными характеристиками. Уменьшение длительности окисления способствует повышению энергоэффективности технологического процесса получения битумов. Получаемые при каталитическом окислении битумы характеризуются более высокими значениями дуктильности и термической стабильности, что в свою очередь способствует увеличению длительности эксплуатации, например, дорожных покрытий. Таким образом, предложенный в работе подход может быть рекомендован к реализации на нефтеперерабатывающих предприятиях в качестве наилучшей доступной технологии с целью снижения антропогенного воздействия на компоненты окружающей среды за счет сокращения времени окисления и соответственно уменьшения энергетических затрат.

Таблица 4. Изменение массы исследуемых образцов в зависимости от температуры

Показатель	Потеря массы, мас. %					
Температура, °C	25–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600
Гудрон	1.2	3.8	2.7	10.6	61.5	11.6
Битум, полученный без катализатора	2.5	3.3	5.2	9.3	65.3	14.4
Битум, полученный с катализатором	0.5	0.3	0.5	7.6	72.7	8.6

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аббасов Вагиф Магеррам оглы

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3822-6972>

Эфендиева Лала Мухаммад кызы

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1043-3446>

Черепнова Ютта Павловна

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6590-4797>

Насибова Гюнай Гамбар кызы

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6738-3195>

Алиева Нушаба Муса кызы

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1253-9819>

Ахмедбекова Саида Фуад кызы

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1672-6394>

Мамедов Айаз Музаффар оглы

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4743-8734>

Лядов Антон Сергеевич

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9969-7706>

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Б.А. Бабаевой, сотруднице лаборатории исследования нефти и технологии получения масел Института нефтехимических процессов им. акад. Ю.Г. Мамедалиева Министерства науки и образования Азербайджанской Республики за помощь в подготовке статьи и ценные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование проводилось в Институте нефтехимических процессов им. акад. Ю.Г. Мамедалиева Министерства науки и образования Азербайджанской Республики.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

А.С. Лядов является членом редколлегии журнала «Наногетерогенный катализ»/«Petroleum Chemistry». Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуреев, А.А., Быстров Н.В. Дорожные битумы – вчера, сегодня, завтра // Нефтепереработка и нефтехимия. 2013. № 5. С. 3–6.
2. Cherepnova Yu.P. Road oil bitumens: promising ways for obtaining and controlling properties (review) // Processes of Petrochemistry and Oil Refining. 2024. V. 25. N 3. P. 694–703. <https://doi.org/10.62972/1726-4685.2024.3.694>
3. Gorman J.L., Crawford R.J., Harding I.H. Bitumen emulsions in road construction — A review // Road and Transport Research. 2004. V. 13. I. 1. P. 25–38.
4. Anupam K., Akinmade D., Kasbergen C., Erkens S., Adebisi F. A state-of-the-art review of natural bitumen in pavement: Underlining challenges and the way forward // J. of Cleaner Production. 2023. V. 382. ID 134957. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134957>
5. Moschopedis S.E., Speight J.G. Influence of metal salts on bitumen oxidation // Fuel. 1978. V. 57. I. 4. P. 235–240. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(78\)90122-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(78)90122-9)
6. King G.N. Oxycyclics: understanding catalyzed oxidation mechanisms in bitumen and other petroleum products // Fuel Science and Technology International. 1993. V. 11. I. 1. P. 201–238. <https://doi.org/10.1080/08843759308916063>
7. Lu X., Isacsson U. Modification of road bitumens with thermoplastic polymers // Polymer Testing. 2000. V. 20. I. 1. P. 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00004-0)
8. Zhao F., Liu Y., Lu N., Xu T., Zhu G., Wang K. A review on upgrading and viscosity reduction of heavy oil and bitumen by underground catalytic cracking // Energy Reports. 2021. V. 7. P. 4249–4272. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.094>
9. Li Y., Wang Z., Hu Z., Xu B., Li Y., Pu W., Zhao J. A review of in situ upgrading technology for heavy crude oil // Petroleum. 2021. V. 7. I. 2. P. 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2020.09.004>
10. Abdrabou M.K., Han X., Zeng Y., Zheng Y. Optimization of iron-based catalyst for partial upgrading of Athabasca Bitumen: The role of Fe oxidation state, particle size, and concentration // Fuel. V. 357. Part B. ID 129941. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129941>
11. Шрубок А.О., Грушова Е.И., Нестерова С.В. Окисленные битумы из модифицированного сырья // Труды БГТУ. 2012. № 4. С. 92–95.
12. Шрубок А.О., Грушова Е.И. Особенности жидкофазного окисления нефтяного гудрона в присутствии модификаторов-катализаторов // Труды БГТУ. 2016. № 4. С. 48–53.
13. Аббасов В.М., Зейналов Э.Б., Нуриев Л.Г., Эфендиева Л.М., Джабраилзаде Ш.З. Получение синтетических нафтеновых кислот путем аэробного окисления нафтено-изопарафиновых углеводородов в присутствии солей природных нефтяных кислот // Катализ в промышленности. 2014. № 3. С. 26–31.
14. Аббасов В.М., Эфендиева Л.М., Насибова Г.Г., Алиева Н.М., Ахмедбекова С.Ф., Черепнова Ю.П., Мамедова Ш. Р., Лядов А.С. Получение нефтяных кислот окислением деароматизированного масляного дистиллята // Наногетерогенный катализ. 2024. Т. 9. № 2. С. 111–117 [Abbasov V.M., Afandiyeva L.M., Nasibova G.G., Aliyeva N.M., Ahmadbayova S.F., Cherepnova Yu.P., Mammadova Sh.R., Lyadov A.S. Synthesis of petroleum acids by oxidation of

- dearomatized oil distillate // *Petrol. Chemistry*. 2024. V. 64. N 10. P. 1187–1193. <https://doi.org/10.1134/S0965544124080061>].
15. Пискунов И.В., Панкин А.А., Баширцева Н.Ю. Математическое моделирование процессов производства нефтяных окисленных битумов (обзор) // *Вестник технологического университета*. 2022. Т. 25. № 4. С. 83–94
16. Гордеева И.В., Мельников Д.А., Горбатова В.Н., Резниченко Д.С., Наумова Ю.А. Исследование влияния процесса модификации на групповой состав битума и модификаторов методом Фурье ИК-спектроскопии // *Тонкие химические технологии*. 2020. Т. 15. № 2. С. 56–66. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-2-56-66>
-