

Information about the authors

Ryskul Azhigulova – PhD, Senior Lecturer at the Department of Physical Chemistry, Catalysis and Petrochemistry, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: azhigulova.ryskul@kaznu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4498-8439>.

Binur Mussabayeva – PhD, Professor, Astana International University; e-mail: mussabayevabinur@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2209-1209>.

Aisulu Zhussupova – PhD, Associate Professor at the Department of Physical Chemistry, Catalysis and Petrochemistry, Al-Farabi Kazakh National University; e-mail: Zh.aisulu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3012-0145>.

Aiman Temirova – PhD, Leading Researcher at Institute of Combustion Problems; e-mail: aika179@mail.ru.

Akerke Abylaykhan* – PhD, Leading Researcher at Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials at Al-Farabi KazNU; e-mail: akerkeabylaykhan2@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1489-9603>.

Редакцияға енуі 02.04.2026

Өңдеуден кейін түсуі 30.04.2026

Жариялауға қабылданды 04.05.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-73](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-73)



MPHTI: 61.53.19, 61.45.31, 87.15.09

А.Н. Сабитова, Ж.Ш. Шарипхан, Б.Б. Баяхметова, Ә.Қ. Қабылқақов, Н.Н. Нургалиев*

Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, Семей, ул.Глинки, 20

*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЧИСТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕНТОНИТОВЫХ СОРБЕНТОВ

Аннотация: В работе рассмотрены современные подходы к регенерации масел, включая физические, химические и сорбционные методы, и обоснован выбор адсорбционной очистки как экологически безопасной и технологически простой альтернативы. Разработан эффективный метод очистки и утилизации отработанных моторных масел с использованием природных и модифицированных бентонитовых сорбентов. Объектами исследования являлись отработанное моторное масло KIXX 10W-40, бентониты П1Т1А и «13 горизонт», а также их модифицированные формы, полученные методами кислотной и перекисной активации. Экспериментальные исследования проводились с применением вакуумной маслоочистительной установки и сорбционной фильтрации. Для оценки эффективности очистки использованы методы FTIR-спектроскопии, термогравиметрического анализа (TGA) и ICP-MS. Результаты показали значительное снижение содержания воды, продуктов окисления, серосодержащих соединений и металлических примесей. Наибольшая эффективность достигнута при использовании модифицированного бентонита П1Т1А, обеспечивающего максимальное снижение концентрации загрязнений. Установлено, что модификация повышает удельную поверхность и сорбционную ёмкость, что способствует более эффективному протеканию процессов адсорбции. Предложенный метод отличается простотой реализации, экономичностью и возможностью масштабирования. Он не образует вторичных токсичных отходов и пригоден для промышленного внедрения, обеспечивая снижение экологической нагрузки.

Ключевые слова: отработанные моторные масла, бентонитовые сорбенты, сорбционная очистка, регенерация масел, модифицированные глины, вакуумная дегазация, экологическая безопасность.

Введение

Проведён анализ современных направлений в области очистки и утилизации отработанных моторных масел, а также обоснован выбор эффективного метода регенерации

©А.Н. Сабитова, Ж.Ш. Шарипхан, Б.Б. Баяхметова, Ә.Қ. Қабылқақов, Н.Н. Нургалиев, 2026

с использованием бентонитовых сорбентов. Рассмотрены существующие технологии, представлены методические подходы и результаты применения модифицированных глинистых материалов для повышения степени очистки.

Обзор и обоснование выбора подхода

Отработанные моторные масла представляют собой значительный экологический риск, поскольку образуются в больших объёмах и содержат широкий спектр токсичных компонентов. В их составе накапливаются продукты разложения присадок, включая соединения тяжёлых металлов (Zn, Pb и др.), а также устойчивые органические загрязнители – полициклические ароматические углеводороды, фенолы и хлорорганические соединения. Эти вещества обладают высокой токсичностью, включая канцерогенные и мутагенные свойства, и характеризуются низкой биodeградацией.

Попадание отработанных масел в окружающую среду приводит к длительному загрязнению почвы и водных объектов. Даже незначительные количества способны формировать устойчивую плёнку на поверхности воды, нарушая естественные процессы газообмена и функционирование экосистем. В связи с этим разработка эффективных методов их переработки и повторного использования является актуальной задачей.

Существующие технологии регенерации отработанных масел включают физические, химические и комбинированные методы. К физическим методам относятся отстаивание, фильтрация, центрифугирование и вакуумная дегазация, позволяющие удалять воду и механические примеси. Однако данные методы недостаточно эффективны в отношении растворённых органических соединений.

Химические методы, такие как кислотная и щелочная обработка, экстракция растворителями и гидрогенизация, обеспечивают более глубокую очистку, однако сопровождаются образованием вторичных загрязняющих отходов, высокой энергоёмкостью и значительными затратами реагентов. В современных технологических схемах часто используется комбинация нескольких стадий очистки.

В связи с ограничениями традиционных подходов возрастает интерес к сорбционным технологиям, основанным на применении природных и модифицированных материалов. Эти методы отличаются экологической безопасностью, экономической доступностью и высокой эффективностью удаления различных загрязнений.

Особое внимание уделяется бентонитовым глинам, содержащим монтмориллонит. Благодаря развитой пористой структуре, высокой удельной поверхности и ионообменным свойствам они способны эффективно адсорбировать полярные соединения, включая кислоты, влагу и ионы металлов.

Для повышения сорбционных характеристик применяются различные способы модификации бентонитов. Кислотная активация увеличивает площадь поверхности и пористость, органическая модификация повышает способность к адсорбции неполярных соединений, а введение магнитных компонентов упрощает процесс отделения сорбента.

Таким образом, использование модифицированных бентонитов является перспективным направлением в области регенерации отработанных масел, обеспечивающим эффективную очистку при минимальном воздействии на окружающую среду.

Выбор метода сорбционной очистки

В процессе разработки технологии очистки отработанных моторных масел были рассмотрены различные методы, включая физические, химические и физико-химические подходы. Физические методы позволяют эффективно удалять воду и механические загрязнения, однако не обеспечивают устранения растворённых органических веществ и продуктов окисления.

Химические методы характеризуются высокой степенью очистки, но сопровождаются образованием вторичных отходов и требуют значительных затрат реагентов и энергии.

С учётом необходимости повышения экологической безопасности и упрощения технологического процесса в данной работе был выбран сорбционный метод очистки с использованием бентонитовых материалов. Данный подход отличается простотой реализации, низкой энергоёмкостью, возможностью повторного использования сорбента и отсутствием образования токсичных побочных продуктов.

В качестве сорбентов применялись бентониты марок П1Т1А и «Горизонт 13», относящиеся к монтмориллонитовому типу. Для повышения их эффективности использовались методы химической модификации, включая кислотную активацию и

обработку пероксидом водорода. Эти методы способствуют увеличению удельной поверхности, развитию пористой структуры и формированию дополнительных активных центров.

Применение модифицированных бентонитов обеспечивает эффективное удаление как полярных функциональных групп (O-H, C=O, S=O), так и неполярных углеводородных соединений, что способствует восстановлению эксплуатационных характеристик очищаемых масел.

Объекты исследования

В качестве объекта исследования использовалось отработанное моторное масло марки KIXX 10W-40 (SAE 10W-40, API SL/CF), представляющее собой полусинтетическое масло на основе минеральных базовых компонентов с добавлением комплекса функциональных присадок. Данный тип масла широко применяется в двигателях внутреннего сгорания и характеризуется кинематической вязкостью порядка 15 мм²/с при 100°C и температурой вспышки около 246°C.

В качестве сорбционных материалов использовались природные бентонитовые глины марок П1Т1А и «Горизонт 13». Согласно данным инфракрасной спектроскопии, оба образца относятся к монтмориллонитовому типу. Их спектры характеризуются наличием полос валентных колебаний гидроксильных групп (3600-3200 см⁻¹), а также полос Si-O (1030, 915, 520 см⁻¹), характерных для структуры бентонита.

Для сравнительного анализа исследовались как исходные, так и модифицированные формы сорбентов. Кислотная активация (обработка растворами серной или соляной кислоты) приводит к увеличению удельной поверхности и формированию развитой мезопористой структуры. Обработка пероксидом водорода способствует окислению примесей и улучшению гидрофильных свойств, что в целом повышает эффективность адсорбции загрязняющих веществ.

Экспериментальная часть

Очистка масла проводилась с использованием многофункциональной вакуумной маслоочистительной установки (рис. 1). Принцип её работы основан на различии температур кипения воды и масла: при понижении давления до вакуумного состояния вода закипает при более низкой температуре, тогда как масло сохраняет жидкую фазу.



Рисунок 1 – Вакуумный маслоочиститель

В состав установки входят масляный насос, нагревательный блок (камера подогрева), вакуумная распылительная камера, конденсатор, а также фильтры грубой и тонкой очистки. Рабочий процесс организован следующим образом: масло из резервуара с помощью насоса проходит через фильтр грубой очистки и поступает в нагреватель. При создании разрежения (~40-50 кПа) подогретое до 40-75°C масло подается в вакуумную камеру, где распыляется. В этих условиях содержащаяся в масле вода и растворённые газы интенсивно испаряются и удаляются вакуумным насосом в конденсатор, где пары охлаждаются и переходят обратно в жидкое состояние.

После этого очищенное и обезвоженное масло проходит через фильтр тонкой очистки и возвращается в систему под давлением. Таким образом обеспечивается удаление механических примесей, влаги и газов. Существенным преимуществом вакуумной технологии

является возможность проведения процесса при сравнительно низких температурах (20-60°C при остаточном давлении 160-260 мм рт. ст.), что позволяет снизить риск термического разложения масла.

Все элементы установки, включая насосы, фильтры, конденсатор и систему управления, объединены в единую циркуляционную схему, обеспечивающую непрерывную рециркуляцию масла через зоны вакуумной дегазации и адсорбционной очистки.

Процедура сорбционной фильтрации

Отработанное масло предварительно нагревали до температуры 80-120°C с целью снижения вязкости и повышения активности адсорбента. Затем в цилиндрическую ёмкость, содержащую 500 мл масла, вводили рассчитанное количество бентонита (как правило, 2-7 % от объёма масла). Полученную смесь выдерживали при постоянной температуре (например, 120°C) при непрерывном перемешивании либо в режиме рециркуляции в течение 1-2 часов.

После стадии контакта проводили разделение фаз: нагретую суспензию помещали в центрифугу и обрабатывали при скорости около 3000 об/мин в течение примерно 10 минут (при ~80°C), что обеспечивало осаждение бентонита с адсорбированными загрязнениями. Очищенное масло отделяли методом декантации, после чего дополнительно фильтровали через плотный тканевый или стекловолоконный фильтр при температуре около 80°C для удаления остаточных взвешенных частиц.

Для оценки эффективности очистки фиксировали объём и степень прозрачности полученного масла. В качестве контрольного эксперимента исходное масло также пропускали через фильтр при аналогичных условиях.

Материалы и методы

FTIR-анализ

Для исследования химического состава применяли метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Спектры бентонитовых образцов (в виде порошка или таблеток с KBr), а также образцов масла регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре (например, PerkinElmer или Bruker) в диапазоне 4000-400 см⁻¹ с разрешением порядка 4 см⁻¹ (при 64 накоплениях).

Подготовка проб бентонита осуществлялась либо прессованием с KBr, либо методом ATR (нанесение порошка на алмазный кристалл). Образцы масла анализировали в тонкослойных кюветах либо в смеси с порошком KBr. Использование детекторов типа DTGS или MCT обеспечивало регистрацию даже слабых полос поглощения.

Выбранный спектральный диапазон позволяет фиксировать основные колебательные полосы функциональных групп (O-H, C-H, C=O, Si-O и др.), что делает метод чувствительным к изменениям структуры вещества после очистки.

Термогравиметрический анализ (TGA)

Термогравиметрические исследования природных и модифицированных бентонитов, а также образцов масла проводили с использованием термоанализатора (например, TA Instruments или Netzsch STA). Нагрев осуществляли от комнатной температуры до ~1000°C в атмосфере азота или воздуха (чаще N₂) со скоростью около 10 °C/мин.

Такие условия позволяют отслеживать последовательные стадии потери массы: удаление адсорбционной влаги (до ~200°C), межслойной воды, процессы дегидроксилирования (300-600°C), а также разложение органических компонентов. Масса образцов составляла 10-20 мг, измерения проводили с точностью до 0,1 мг. При необходимости дополнительно регистрировали состав выделяющихся газов.

Полученные TG/DTG-кривые использовали для оценки термической устойчивости, степени гидратации бентонитов и содержания летучих компонентов в масле.

Элементный анализ (EDS)

Определение элементного состава осуществляли методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в сочетании с растровой электронной микроскопией. Объектами анализа служили частицы бентонита после взаимодействия с маслом, а также остатки масла, нанесённые на подложку.

Под действием электронного пучка регистрировали характеристическое рентгеновское излучение, по энергии которого идентифицировали элементы (Al, Si, Fe, Ca и др.), а по интенсивности – оценивали их относительное содержание. Метод позволяет анализировать микроскопические объёмы вещества (порядка нескольких мкм³).

Данный подход использовали для контроля удаления металлических примесей (Fe, Cu, Cr и др.) из отработанного масла, их переноса на поверхность бентонита, а также выявления возможных загрязнений, связанных с самим адсорбентом.

Результаты и обсуждение

Характеристика сорбентов

Природные бентониты (например, образцы П1Т1А и «13 горизонт») представляют собой тонкодисперсные глинистые материалы, относящиеся преимущественно к смектитовой группе минералов, где основным компонентом является монтмориллонит. Эти материалы характеризуются однородной мягкой структурой, пластичностью и способностью к значительному набуханию при взаимодействии с водой.

Цвет бентонитов обычно варьируется от светло-серого до бежевого, однако наличие примесей оксидов железа может придавать им зеленоватые или красноватые оттенки.

К основным физическим характеристикам относятся: плотность в пределах 2,0-2,7 г/см³, крайне малый размер частиц (часто менее 1-2 мкм), высокая удельная поверхность (более 100-200 м²/г), а также способность удерживать значительное количество влаги (до 10-40%).

Совокупность этих свойств определяет высокую ионообменную и адсорбционную активность бентонитов.

FTIR-анализ

На рисунке 2 приведены ИК-спектры природных бентонитов демонстрируют характерные полосы поглощения, соответствующие основным функциональным группам. В частности, интенсивные полосы в области 3620-3650 см⁻¹ связаны с валентными колебаниями гидроксильных групп (Al-Al-OH, Al-Mg-OH) в структуре минерала.

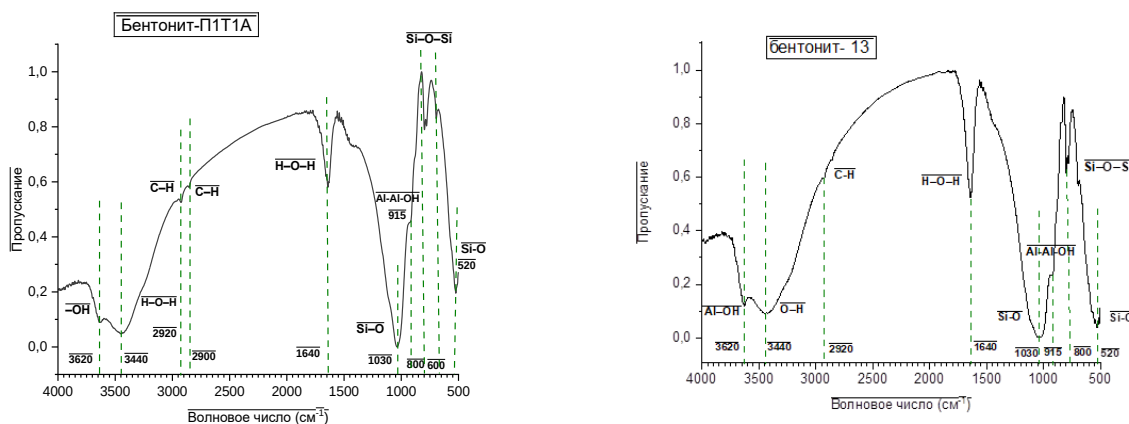


Рисунок 2 – ИК спектр бентонитов

Полоса около 1630-1635 см⁻¹ обусловлена деформационными колебаниями молекул воды в межслоевом пространстве. Сильный пик в диапазоне 980-1000 см⁻¹ относится к колебаниям связей Si-O-Si в кремнекислородных тетраэдрах. Дополнительно наблюдаются полосы около 908 см⁻¹ (Al-Al-OH) и ~700 см⁻¹ (Al-Mg-OH), а также низкочастотные колебания (600-500 см⁻¹), соответствующие связям Si-O-Al и Si-O-Mg.

После химической модификации (например, кислотной активации) отмечается снижение интенсивности полос, связанных с межслоевой водой (3420-3440 и 1630 см⁻¹), а также усиление сигналов в области 800-1000 см⁻¹, что свидетельствует о формировании аморфных кремнеземистых структур.

Сорбционная ёмкость

Сорбционная ёмкость сорбента (q) характеризует количество адсорбированного вещества (металлов или органических соединений), приходящееся на единицу массы сорбента. Данный параметр рассчитывается по выражению:

где C_0 и C_e – начальная и равновесная концентрации вещества в растворе (мг/л),
 V – объём раствора (л),
 m – масса сорбента (г) [15].

Таким образом, сорбционная ёмкость выражается в мг адсорбированного вещества на 1 г сорбента. Установлено, что различные методы модификации, в частности кислотная активация и функционализация, способствуют увеличению данного показателя за счёт роста удельной поверхности и количества активных центров. По литературным данным, значение q после кислотной обработки может возрастать на 50-100 %.

Термогравиметрический анализ

Термогравиметрический анализ природных бентонитов (рис. 3) показывает наличие двух характерных стадий потери массы. Первая, низкотемпературная стадия связана с удалением адсорбированной и межслойной воды. В диапазоне температур до 100–150 °C фиксируется снижение массы примерно на 8-12%, что обусловлено испарением связанной влаги [13, 14]. Вторая стадия обусловлена процессом дегидроксилирования структурной воды монтмориллонита. При нагревании в интервале 400-600 °C наблюдается дополнительная потеря массы порядка 4-6%, связанная с разложением гидроксильных групп [15, 16]. Указанные температурные интервалы и величины изменения массы хорошо согласуются с данными, представленными в научной литературе.

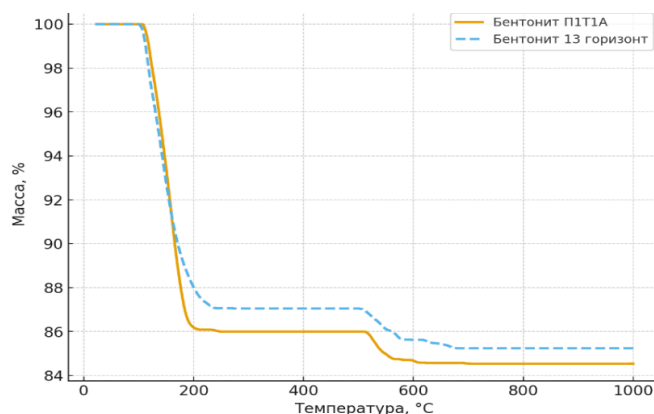


Рисунок 3 – ТГА анализ бентонитов

В качестве исходного образца использовалось моторное масло марки KIXX 10W-40. Образцы обозначены следующим образом:

Процесс очистки проводили при комнатной температуре при постоянном перемешивании. Соотношение масло: сорбент составляло примерно 10:1 по массе, а время контакта – 15-30 минут. Модифицированные сорбенты получали путём кислотной активации природных глин, что позволило повысить их адсорбционные свойства.

Таблица 1 – Сорбционная ёмкость бентонитов

Образец	V_1 (мл)	V_2 (мл)	Адсорбция, X (%)
Бентонит П1Т1А	7.85	7.05	10.16
Бентонит 13 горизонт	7.85	7.20	8.26

Процесс очистки осуществляли при комнатной температуре в условиях постоянного перемешивания. Массовое соотношение масло: сорбент составляло приблизительно 10:1, а продолжительность контакта находилась в пределах 15-30 минут. Модифицированные сорбенты получали путём кислотной активации природных глин с целью повышения их адсорбционной эффективности.

FTIR-анализ масел

На рисунке 4 представлены совмещённые инфракрасные спектры всех исследованных образцов масла. В спектрах отчётливо наблюдаются характерные полосы алифатических C-H связей (около 2920 и 2850 см^{-1}), полоса карбонильной группы (~1700 см^{-1}), обусловленная продуктами окисления углеводородов и компонентами присадок, широкая полоса O-H (~3400 см^{-1}), а также полоса S=O (1100-1150 см^{-1}), связанная с серосодержащими соединениями.

Наибольшая интенсивность всех указанных полос характерна для исходного масла (m_0). После фильтрации наблюдается их постепенное снижение, наиболее выраженное при использовании бентонитовых сорбентов. В частности, значительное уменьшение полосы O-H свидетельствует об удалении влаги и кислородсодержащих соединений.

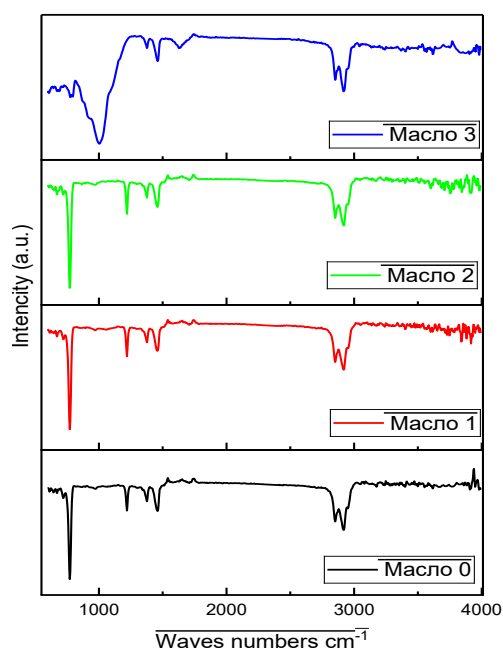


Рисунок 4 – ИК-спектры образцов моторных масел до и после фильтрации (m0-m3)

Аналогично, ослабление полос алифатических C-H (2922 и 2854 cm^{-1}) указывает на снижение содержания органических примесей. Уменьшение интенсивности карбонильной полосы (~ 1700 cm^{-1}) в образцах m2 и m3 подтверждает удаление продуктов окисления масла, таких как кислоты и кетоны.

Снижение интенсивности полос S=O (~ 1120 - 1180 cm^{-1}) свидетельствует об эффективной адсорбции серосодержащих соединений. Кроме того, полосы, характерные для ароматических структур и лёгких углеводородов (в области 700 - 900 cm^{-1}), после обработки бентонитами практически исчезают, что указывает на удаление топливных и ароматических примесей.

Сравнительный анализ показал, что бумажная фильтрация (m1) обеспечивает лишь частичное удаление механических загрязнений и практически не влияет на химический состав масла. В то же время обработка бентонитами (m2, m3) приводит к значительному снижению интенсивности большинства полос, что свидетельствует об эффективном удалении как механических, так и химических примесей.

Наиболее выраженный эффект наблюдается при использовании бентонита П1Т1А (m2), для которого зафиксировано максимальное ослабление ключевых полос поглощения. Бентонит «Глина 13» (m3) также демонстрирует заметный очищающий эффект, однако в меньшей степени.

В целом результаты FTIR-анализа подтверждают, что применение бентонитовых сорбентов значительно повышает эффективность регенерации отработанных масел за счёт удаления влаги, продуктов окисления, серосодержащих соединений и углеводородных примесей.

Элементный анализ масел

Определение элементного состава отработанных масел до и после очистки проводилось методом индуктивно-связанной плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) в соответствии с требованиями ГОСТ ISO 17294-2-2019. Аналитические исследования выполнялись в аккредитованной лаборатории ТОО «НИЦ EventumLab».

В анализ были включены следующие образцы: исходное отработанное масло (m0), масло после фильтрации через бумажный фильтр (m1), а также образцы, прошедшие обработку природными и модифицированными бентонитовыми сорбентами (m2-m5).

Результаты количественного определения концентраций ключевых элементов, характеризующих степень загрязнения масла продуктами износа, металлическими примесями и компонентами присадок, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Содержание элементов в образцах масел до и после фильтрации, мг/кг (г/т)

Элемент	m0 (исх.)	m1 (ф.бумага)	m2 (П1Т1А)	m3 (13 гор.)	m4 (П1Т1А мод.)	m5 (13 гор. мод.)
Al	5000	23000	п/о	3300	21000	4500
Ca	47000	70000	п/о	2400	62000	53000
Cr	340	280	п/о	68	740	140
Cu	79	61	п/о	п/о	п/о	63
Fe	3200	4200	п/о	1900	5400	3600
K	1000	5700	п/о	150	3000	12000
Mg	1600	18000	п/о	700	2400	2200
Mn	<п.о.	18000	п/о	16	93	35
Na	4300	17000	п/о	1500	8900	12000
Zn	35000	58000	п/о	1300	23000	46000

Результаты ICP-MS анализа показали, что концентрации металлов (Fe, Cu, Cr, Zn), а также щелочноземельных элементов (Ca, Mg) существенно снижаются после проведения фильтрации, особенно при использовании бентонитовых сорбентов – как природных, так и модифицированных.

Так, содержание цинка, являющегося типичным компонентом антиокислительных и противоизносных присадок, в образце m3 уменьшается более чем в 25 раз, тогда как концентрация железа, связанного с процессами износа, снижается почти вдвое. В образце m2 концентрации всех исследуемых элементов оказались ниже предела обнаружения, что свидетельствует о высокой эффективности адсорбционных свойств сорбента П1Т1А.

Дополнительно зафиксировано снижение содержания натрия, калия и марганца, что указывает на удаление водорастворимых загрязнений, накопленных в процессе эксплуатации масла.

Полученные результаты согласуются с данными зарубежных исследований, согласно которым глинистые материалы характеризуются высокой сорбционной способностью по отношению к металлическим и органическим примесям, особенно после химической модификации. При этом элементный состав масла может рассматриваться как косвенный показатель степени износа двигателя и деградации смазочного материала, а его восстановление способствует снижению рисков при повторном использовании.

Сравнение эффективности сорбентов

Визуальная оценка показала существенные различия между исходным и очищенными образцами масла. После проведения адсорбционной обработки с использованием бентонитов наблюдается выраженное осветление и повышение прозрачности масла.

Наиболее заметный эффект достигнут для образца m4 (модифицированный П1Т1А), который характеризуется высокой степенью прозрачности и практически полным отсутствием видимых взвешенных частиц. Это свидетельствует о высокой эффективности данного сорбента в удалении как механических, так и коллоидных загрязнений.

В целом, применение бентонитовых материалов обеспечивает значительное улучшение оптических характеристик масла, что косвенно подтверждает его очистку от примесей.

Выводы

В рамках данного исследования была подтверждена эффективность использования природных и модифицированных бентонитов (П1Т1А и «13 горизонт») для очистки отработанных моторных масел марки KIXX 10W-40.

Проведённый комплекс исследований включал физико-химическую характеристику сорбентов (методы FTIR и TGA), оценку сорбционной ёмкости, а также анализ очищенных образцов масла с использованием инфракрасной спектроскопии и ICP-MS. Результаты FTIR-анализа показали значительное снижение интенсивности полос, соответствующих полярным соединениям и продуктам окисления (O-H, C=O, S=O), что свидетельствует об эффективном удалении влаги, кислотных соединений и смолистых компонентов, особенно при применении активированного бентонита П1Т1А. Термогравиметрический анализ подтвердил термическую стабильность исследуемых сорбентов и их пригодность для использования в условиях фильтрации.

Установлено, что модифицированные бентониты обладают более высокой сорбционной ёмкостью по сравнению с природными аналогами, что обусловлено увеличением удельной поверхности и числом активных центров. Результаты элементного анализа продемонстрировали существенное снижение концентраций металлов (Fe, Zn, Cr), щелочноземельных элементов (Ca, Mg) и других примесей после обработки масла. Наиболее высокую эффективность показал модифицированный сорбент П1Т1А, при использовании которого содержание большинства элементов снижалось до уровня ниже предела обнаружения.

Таким образом, разработанный подход к регенерации моторных масел с применением природных и активированных бентонитов позволяет значительно повысить степень очистки от воды, органических и неорганических загрязнений. Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения сорбционно-фильтрационных технологий в процессы переработки и повторного использования технических масел.

Список литературы

1. Ассоциация «Ресурс». 2023. РЭО: лишь 25% от 2 млн тонн отработанных смазочных масел собирается для утилизации в России. <https://reo.ru>.
2. Vazquez-Duhalt R. Environmental impact of used motor oil / R. Vazquez-Duhalt // *Science of the Total Environment*. – 1989. – № 79(1). – P. 1-23. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(89\)90049-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90049-1).
3. GlobeCore. (n.d.). Regeneration of used oil: reality and perspectives. Retrieved from <https://globecore.com/publications/regeneration-used-oil/>.
4. Advancing sustainable lubricating oil management: Re-refining techniques, market insights, innovative enhancements, and conversion to fuel / M.R.I. Sazzad et al // *Heliyon*. – 2024. – № 10(20). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39248>.
5. European Commission. 2023. Technical report: Waste oils management in the EU (C.OM(2023) 670 final). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023DC0670>.
6. Rajaković-Ognjanović V. Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials / V. Rajaković-Ognjanović, G. Aleksić, Lj. Rajaković // *Journal of Hazardous Materials*. – 2008. – № 154(1-3). – P. 558-563. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.066>.
7. Enhanced removal of diesel oil using new magnetic bentonite-based adsorbents combined with different carbon sources / D. Ewis et al // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2022. – № 233, Article 195. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05662-2>.
8. Teneqja V. Activation of Kosovo bentonite with sulphuric acid for recycling of used motor oils / V. Teneqja, S. Drushku // *Journal of International Environmental Application & Science*. – 2015. – № 10(4). – P. 408-413. <https://izlik.org/JA33PY39PX>.
9. Syrmanova K.K. Chemistry and recycling technology of used motor oil / K.K. Syrmanova, A.Y. Kovaleva, Zh. Kaldybekova // *Oriental Journal of Chemistry*. – 2017. – № 33(6). – P. 3195-3199. <https://doi.org/10.13005/ojc/330665>.
10. Cheon Y. Effects of thermal treatment on bentonite stability and europium(III) leachability / Y. Cheon, S. Kim, H.Y. Jeong // *Journal of Analytical Science and Technology*. – 2025. – № 16(1). – P. 6. <https://doi.org/10.1186/s40543-025-00645-2>.
11. Unlocking the energy potential of Moroccan bentonite clay: structural, optical, and thermal insights for advanced applications / N.E. Ghouali et al // *Discover Applied Sciences*. – 2025. – № 7. – P. 887. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-08787-2>.
12. Removal of metal ions and humic acids through polyetherimide membrane with grafted bentonite clay / R.S. Hebbar et al // *Scientific Reports*. – 2018. – № 8(1). – P. 4939. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23225-3>.
13. Acid activation of bentonite clay for recycled automotive oil purification / J. Aguilar et al // *E3S Web of Conferences*. – 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019103002>.
14. Singh H. Regeneration of used lubricating oil by novel clay-based adsorbents: A comparative FTIR study / H. Singh, R. Gupta, A. Singh // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.106987>.
15. Adsorption and desorption effect of modified bentonite on soil heavy metal Pb/Cd and the feasibility assessment of reducing the ecotoxicity / X. Yang et al // *Environmental Sciences Europe*. – 2025. – № 37(1). – P. 105. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-00798-4>.
16. Removal of metal ions and humic acids through polyetherimide membrane with grafted bentonite clay / R.S. Hebbar et al // *Scientific Reports*. – 2018. – № 8(1). – P. 4939. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23225-3>.

17. Acid activation of bentonite clay for recycled automotive oil purification / J. Aguilar et al // E3S Web of Conferences. – 2020. – № 191. – P. 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019103002>.
18. Singh H. Regeneration of used lubricating oil by novel clay-based adsorbents: A comparative FTIR study / H. Singh, R. Gupta, A. Singh // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – № 10(1). – P. 106987. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.106987>.
19. Wolak A. FTIR analysis and monitoring of used synthetic oils operated under similar driving conditions / A. Wolak, W. Krasodowski, G. Zając // Friction. – 2020. – № 8. – P. 995-1006. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0343-2>.
20. Onukwuli O.D. Metal ions adsorption from used lubricating oil using modified clays / O.D. Onukwuli, L.N. Emembolu // Chemical Engineering Communications. – 2017. – № 204(9). – P. 1063-1073. <https://doi.org/10.1080/00986445.2017.1281845>.
21. Oliveira A.A. Adsorption of metals and organics from spent oils using peroxide-activated bentonites / A.A. Oliveira, M.L. da Silva, W.T.P. Dos Santos // Environmental Technology. – 2021. – № 42(1). – P. 82-92. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1714567>.
22. Sharma B.K. Used lubricating oil regeneration using advanced clay treatment / B.K. Sharma, M. Rashid // Journal of Environmental Management. – 2016. – № 181. – P. 806-813. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.029>.

Благодарность

Работа проведена при финансовой помощи Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант BR24993178 «Разработка инновационной технологии переработки вторичных ресурсов – отходов металлургических производств, побочных продуктов нефтепереработки и нефтедобычи».

А.Н. Сәбитова, Ж.Ш. Шәріпхан, Б.Б. Баяхметова, Ә.Қ. Қабылқақов, Н.Н. Нұрғалиев*

Шәкәрім университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей, Глинка көшесі, 20
*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН МОТОР МАЙЛАРЫН БЕНТОНИТТІ СОРБЕНТТЕРДІ ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ТАЗARTY ЖӘНЕ КӘДЕГЕ ЖАРATY ӘДІСІН ӘЗІРЛЕУ

Бұл жұмыста майларды регенерациялаудың заманауи тәсілдері, соның ішінде физикалық, химиялық және сорбциялық әдістер қарастырылып, адсорбциялық тазарту экологиялық қауіпсіз әрі технологиялық тұрғыдан қарапайым балама ретінде негізделді. Табиғи және модификацияланған бентонитті сорбенттерді қолдану арқылы пайдаланылған мотор майларын тиімді тазарту және кәдеге жарату әдісі әзірленді. Зерттеу нысандары ретінде K1XX 10W-40 пайдаланылған мотор майы, П1Т1А және «13 горизонт» бентониттері, сондай-ақ олардың қышқылдық және пероксидтік активация арқылы алынған түрлері қолданылды. Эксперименттік зерттеулер вакуумдық май тазарту қондырғысы мен сорбциялық сүзу әдістерін пайдалану арқылы жүргізілді. Тазарту тиімділігін бағалау үшін FTIR-спектроскопия, термогравиметриялық талдау (TGA) және ICP-MS әдістері қолданылды. Зерттеу нәтижелері май құрамындағы су, тотығу өнімдері, күкіртті қосылыстар мен металл қоспаларының айтарлықтай азайғанын көрсетті. Ең жоғары тиімділік модификацияланған П1Т1А бентонитін қолданғанда байқалды. Модификация сорбенттің меншікті беті мен сорбциялық сыйымдылығын арттырып, адсорбция процесінің тиімділігін жоғарылатады. Сонымен қатар, бұл әдіс энергия шығынын азайтып, экономикалық тиімділікті арттыруға мүмкіндік береді. Ұсынылған тәсіл қарапайым, үнемді, масштабтауға қолайлы және екінші реттік улы қалдықтар түзбейді, сондықтан оны өнеркәсіпте кеңінен қолдануға болады.

Түйін сөздер: пайдаланылған мотор майлары, бентонитті сорбенттер, сорбциялық тазарту, майларды регенерациялау, модификацияланған саздар, вакуумдық дегазация, экологиялық қауіпсіздік.

A.N. Sabitova, Zh.Sh. Sharipkhan, B.B. Bayakhmetova, A.K. Kabylkakov, N.N. Nurgaliyev*

Shakarim University,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki street, 20
*e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR PURIFICATION AND UTILIZATION OF USED MOTOR OILS USING BENTONITE SORBENTS

The study examines modern approaches to oil regeneration, including physical, chemical, and sorption methods, and substantiates the choice of adsorption purification as an environmentally safe and technologically simple alternative. An effective method for the purification and utilization of used motor oils using natural and modified bentonite sorbents has been developed. The research objects included used KIXX 10W-40 motor oil, P1T1A and «13 Horizon» bentonites, as well as their modified forms obtained through acid and peroxide activation methods. Experimental studies were carried out using a vacuum oil purification unit and sorption filtration techniques. The purification efficiency was evaluated using FTIR spectroscopy, thermogravimetric analysis (TGA), and ICP-MS methods. The results demonstrated a significant reduction in water content, oxidation products, sulfur-containing compounds, and metal impurities. The highest efficiency was achieved with modified P1T1A bentonite, ensuring maximum contaminant removal. It was established that modification increases specific surface area and sorption capacity, enhancing adsorption processes. The proposed method is simple, cost-effective, scalable, and does not generate secondary toxic waste, making it suitable for industrial application while reducing environmental impact.

Key words: used motor oils, bentonite sorbents, sorption purification, oil regeneration, modified clays, vacuum degassing, environmental safety.

Авторлар туралы мәліметтер

Альфира Нұржанқызы Сәбитова – PhD, қауымдастырылған профессор, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы меңгерушісі; e-mail: a.sabitova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3360-7998>.

Жанна Шәріпханқызы Шәріпхан – докторант, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2484-7287>.

Бұлбұл Баяхметқызы Баяхметова – х.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: b.baiahmetova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5663-5107>.

Әміржан Қуанышұлы Қабылқақов – студент, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: amir.kabyl@mail.ru.

Нұржан Нұрлыбекұлы Нұрғалиев* – PhD, доцент-зерттеуші, Шәкәрім университеті, Химия және экология кафедрасы; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Сведения об авторах

Альфира Нұржановна Сабитова – PhD, ассоциированный профессор, Шәкәрім университет, заведующий кафедры химии и экологии; e-mail: a.sabitova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3360-7998>.

Жанна Шарипхановна Шарипхан – докторант, Шәкәрім университет, кафедра химии и экологии; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2484-7287>.

Булбұл Баяхметовна Баяхметова – к.х.н., ассоциированный профессор, Шәкәрім университет, кафедры химии и экологии; e-mail: b.baiahmetova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5663-5107>.

Әміржан Қуанышұлы Қабылқақов – студент, Шәкәрім университет, кафедры химии и экологии; e-mail: amir.kabyl@mail.ru.

Нуржан Нурлыбекович Нурғалиев* – PhD, доцент-исследователь, Шәкәрім университет, кафедры химии и экологии; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Information about the authors

Alfira Nurzhanovna Sabitova – PhD, associate professor, Shakarim University, Head of the Department Chemistry and Ecology; e-mail: a.sabitova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3360-7998>.

Zhanna Sharipkhankyzy Sharipkhan – PhD -student, Shakarim University, Department Chemistry and Ecology; e-mail: j.shariphan@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2484-7287>.

Bulbul Bayakmetkyzy Bayakhmetova – Cand. Chem.Sci., associate, Shakarim University, Department Chemistry and Ecology; e-mail: b.baiahmetova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5663-5107>.

Amirzhan Kuanyshuly Kabylkakov – student, Shakarim University, Department Chemistry and Ecology; e-mail: amir.kabyl@mail.ru.

Nurzhan Nurlybekuly Nurgaliyev* – PhD, associate professor-researcher, Shakarim University, Department of Chemistry and Ecology; e-mail: n.nurgaliyev@shakarim.kz, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1216-7150>.

Поступила в редакцию 29.03.2026

Поступила после доработки 15.05.2026

Принята к публикации 16.05.2026