

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Геологии и Нефтегазового дела им.К.Турысова

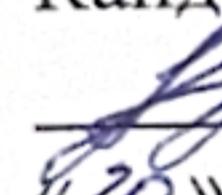
Кафедра Химической и биохимической инженерии

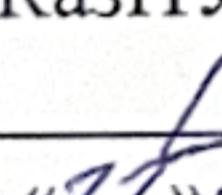
## АРЫСЛАН ЕРҰЛАН ЕРЛАНҰЛЫ

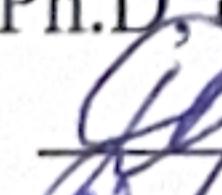
Очистка ароматических соединений в составе нефтяного топлива с помощью  
глубоких эвтектических растворителей

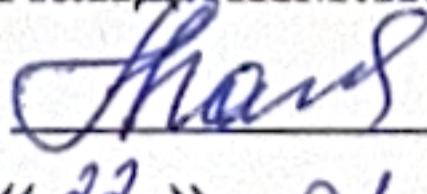
## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07109 – «Химическая инженерия углеводородных соединений»

Научный руководитель:  
Канд.хим.наук.,ассоц. профессор  
 Керимкулова А.Ж.  
«20» 01 2026 г.

Рецензент:  
кандидат химических наук,  
ассоциированный профессор  
кафедры ХиТОВ ПСиП,  
КазНУ имени аль-Фараби  
 Рахметуллаева Р.Ж.  
«22» 01 2026 г.

Норма контролер:  
Ph.D, старший преподаватель  
 Демеубаева Н.С.  
«21» 01 2026 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
Заведующий кафедрой ХиБИ  
Канд.хим.наук., ассоц проф  
 Мангазбаева Р.А.  
«22» 01 2026 г

Алматы 2026 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Геологии и Нефтегазового дела им.К.Турысова

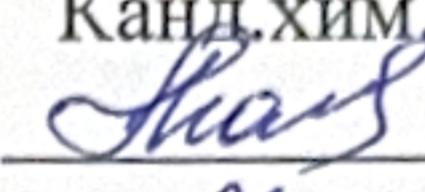
Кафедра Химической и биохимической инженерии

7М07109 – «Химическая инженерия углеводородных соединений»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ХиБИ

Канд.хим.наук., ассоц проф

 Мангазбаева Р.А.

«22» 01 2026 г

**ЗАДАНИЕ**  
**На выполнение магистерской диссертации**

Магистрант: Арыслан Ерулан

Тема: Очистка ароматических соединений в составе нефтяного топлива с помощью глубоких эвтектических растворителей

Утверждена приказом ректора университета № 548-П/Ө от « 4 » декабря 2023

Сроки сдачи законченной работы: 10.01.2026 г.

В данной работе рассматривался возможность применения глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) в качестве вспомогательного инструмента для очистки дизельного топлива от ароматических соединений. ГЭР представляют собой перспективный класс так называемых «зелёных» растворителей, характеризующихся низкой токсичностью, малой летучестью, потенциальной биоразлагаемостью и высокой селективностью по отношению к ароматическим углеводородам.

Задачи диссертации:

- а) синтезировать глубокие эвтектические растворители;*
- б) исследовать синтезированные глубокие эвтектические растворители;*
- в) использовать синтезированные глубокие эвтектические растворители в качестве деароматизаторов дизеля;*
- г) анализировать полученные данные.*

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

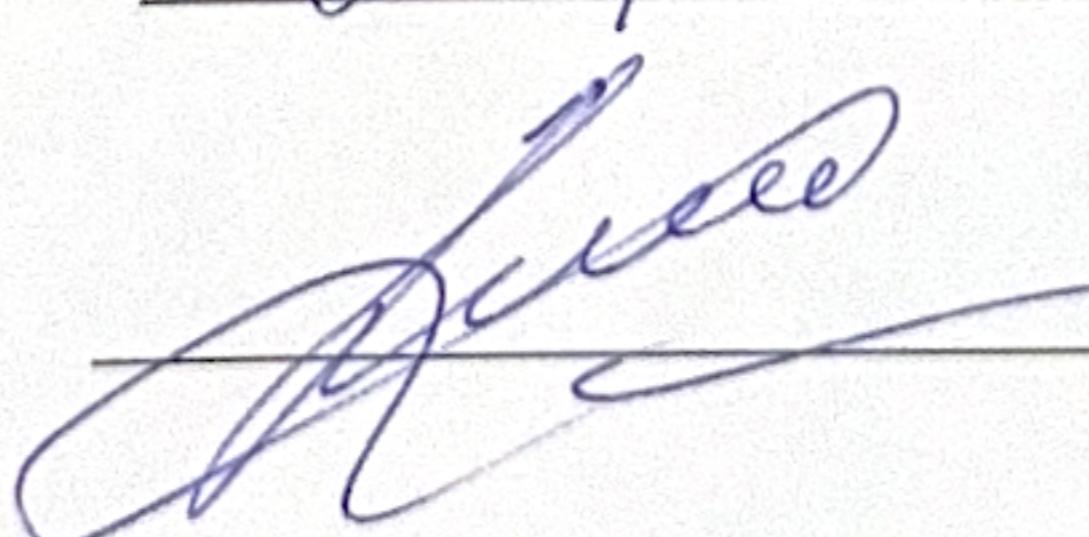
| Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов | Сроки представления научному руководителю | Примечание |
|--|---|------------|
| Теоретическая часть                                      | 20.05.2024 г                              | Выполнено  |
| Экспериментальная часть                                  | 02.10.2024 - 20.12.2025 гг                | Выполнено  |
| Результаты и обсуждения                                  | 01.10.2025 - 10.01.2026 гг                | Выполнено  |

**Подписи**

Консультантов и норм контролера на законченную магистерскую работу указанием относящихся к ним разделов работы

| Наименование разделов   | Консультанты, И.О.Ф.<br>(уч.степень, звание)           | Дата<br>подписания | Подпись   |
|-------------------------|--|--------------------|---|
| Теоретическая часть     | Канд.хим.наук.,ассоц.<br>профессор<br>Керимкулова А.Ж. | 20.05.2024ж        |  |
| Экспериментальная часть | Канд.хим.наук.,ассоц.<br>профессор<br>Керимкулова А.Ж. | 20.12.2025         |  |
| Результаты и обсуждения | Канд.хим.наук.,ассоц.<br>профессор<br>Керимкулова А.Ж. | 10.01.2026         |  |
| Нормоконтролер          | Демеубаева Н.С.<br>Ph.D., старший<br>преподаватель     | 20.01.2026         |  |

Научный руководитель  
Канд хим наук, ассоц.  
профессор  
Задание принял к исполнению  
магистрант

  
 Керимкулова А.Ж.  
Арыслан Е.Е.  
«20» январь 2024 г.

## АННОТАЦИЯ

В условиях глобального ужесточения экологических требований к качеству нефтяных топлив и роста спроса на дизельное топливо проблема снижения содержания ароматических соединений приобретает актуальность. Ароматические углеводороды, присутствующие в составе дизельного топлива, оказывают негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека из-за их повышенной токсичности и канцерогенных свойств, а также ухудшают экологические и эксплуатационные показатели топлива.

Дополнительную сложность представляет необходимость поддержания требуемого качества дизельного топлива в условиях увеличения производственной нагрузки без модернизации технологического оборудования. Так, при проектной загрузке установки порядка 200 м<sup>3</sup>/ч фактическая переработка дизельного топлива на Шымкентском НПЗ в настоящее время достигает 315 м<sup>3</sup>/ч. Эксплуатация установки в таких режимах приводит к росту нагрузок на аппараты, снижению эффективности протекающих процессов и, как следствие, к ухудшению качества и экологичности продукта.

В данной работе рассматривается возможность применения глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) в качестве вспомогательного инструмента для очистки дизельного топлива от ароматических соединений. ГЭР представляют собой перспективный класс так называемых «зелёных» растворителей, характеризующихся низкой токсичностью, малой летучестью, потенциальной биоразлагаемостью и высокой селективностью по отношению к ароматическим углеводородам.

В рамках исследования анализируются физико-химические свойства ГЭР, механизмы их взаимодействия с ароматическими соединениями и эффективность их применения для селективного извлечения ароматики из дизельного топлива. Оценка качества продукта проводилась по результатам ИК и УФ спектроскопии.

## АНДАТПА

Мұнай отындарының сапасына қойылатын экологиялық талаптардың жаһандық деңгейде қатаюы және дизель отынына сұраныстың артуы жағдайында ароматты қосылыстардың құрамын төмендету мәселесі өзектілігін арттыруда. Дизель отынның құрамында болатын ароматты көмірсүтектер олардың жоғары уыттылығы мен канцерогендік қасиеттеріне байланысты қоршаған ортаға және адам денсаулығына теріс әсер етеді, сондай-ақ отынның экологиялық және пайдалану көрсеткіштерін нашарлатады.

Қосымша қындық технологиялық жабдықты жаңғыртусыз өндірістік жүктеменің артуы жағдайында дизель отынның талап етілетін сапасын қамтамасыз ету қажеттілігімен байланысты. Атап айтқанда, қондырғының жобалық өнімділігі шамамен  $200 \text{ м}^3/\text{сағ}$  болған жағдайда, Шымкент мұнай өндеу зауытында дизель отынның өндеудің нақты көлемі қазіргі уақытта  $315 \text{ м}^3/\text{сағ}$ -қа жетіп отыр. Мұндай режимдерде қондырғыны пайдалану аппараттарға түсетін жүктеменің артуына, жүріп жатқан процестердің тиімділігінің төмендеуіне және соның салдарынан өнімнің сапасы мен экологиялық көрсеткіштерінің нашарлауына әкеледі.

Бұл жұмыста дизель отынны ароматты қосылыстардан тазарту үшін терең әвтектикалық еріткіштерді (ТЭЕ) қосалқы қуран ретінде қолдану мүмкіндігі қарастырылады. ТЭЕ төмен уыттылығымен, ұшқыштығының аздығымен, әлеуетті биоыдырағыштығымен және ароматты көмірсүтектерге қатысты жоғары селективтілігімен сипатталатын «жасыл» еріткіштердің перспективалы класы болып табылады.

Зерттеу аясында ТЭЕ-нің физика-химиялық қасиеттері, олардың ароматты қосылыстармен өзара әрекеттесу механизмдері және дизель отыннан ароматты көмірсүтектерді селективті түрде бөліп алу тиімділігі талданады. Өнім сапасын бағалау ИК және УК-спектроскопия нәтижелері бойынша жүргізілді.

## ANNOTATION

In the context of the global tightening of environmental requirements for the quality of petroleum fuels and the growing demand for diesel fuel, the issue of reducing the content of aromatic compounds is becoming increasingly relevant. Aromatic hydrocarbons present in diesel fuel have a negative impact on the environment and human health due to their increased toxicity and carcinogenic properties, and also ухудшают the environmental and performance characteristics of the fuel.

An additional challenge is the need to maintain the required quality of diesel fuel under conditions of increased production load without modernization of technological equipment. Thus, at a design capacity of approximately 200 m<sup>3</sup>/h, the actual processing rate of diesel fuel at the Shymkent Oil Refinery currently reaches 315 m<sup>3</sup>/h. Operation of the unit under such conditions leads to increased load on the equipment, reduced efficiency of ongoing processes, and, as a result, deterioration of product quality and environmental performance.

This study considers the possibility of using deep eutectic solvents (DES) as an auxiliary tool for the purification of diesel fuel from aromatic compounds. DES represent a promising class of so-called “green” solvents, characterized by low toxicity, low volatility, potential biodegradability, and high selectivity toward aromatic hydrocarbons.

Within the framework of the study, the physicochemical properties of DES, the mechanisms of their interaction with aromatic compounds, and the efficiency of their application for the selective extraction of aromatics from diesel fuel are analyzed. Product quality assessment was carried out based on the results of IR and UV spectroscopy.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение  |    |
| 1 Основная часть  | 8  |
| 1.1 Классификация ароматических соединений  | 8  |
| 1.2 Экологическое воздействие и токсичность   | 9  |
| 1.3 Глубокие эвтектические растворители (ГЭР)   | 10 |
| 1.4 Особенности взаимодействия ГЭР с органическими соединениями                             | 13 |
| 1.5 Методы очистки нефти  | 14 |
| 1.6 Преимущества ГЭР по сравнению с традиционными методами                                  | 15 |
| 2 Методология исследования  | 17 |
| 2.1 Преимущества глубоких эвтектических растворителей по сравнению с традиционными методами | 17 |
| 2.2 УФ-спектроскопия  | 18 |
| 2.3 ИК-спектроскопия  | 24 |
| 3 Результаты и обсуждение   | 36 |
| 3.1 Характеристика исходного дизельного топлива   | 36 |
| 3.2 Результаты УФ-спектроскопии после обработки ГЭР   | 36 |
| 3.3 Результаты ИК-спектроскопии после обработки ГЭР   | 38 |
| 3.4 Сопоставление УФ- и ИК-спектроскопических данных  | 38 |
| Заключение  | 41 |
| Список литературы   | 43 |

## ВВЕДЕНИЕ

Нефтяная промышленность занимает ключевое место в экономике многих стран, включая Республику Казахстан. Вместе с тем разведка, добыча и переработка нефти неизбежно сопровождаются значительным воздействием на окружающую среду. К основным экологическим проблемам относятся загрязнение почвы, водных ресурсов и атмосферы, во многом обусловленные присутствием в нефтяных отходах и нефтепродуктах вредных компонентов, в частности ароматических соединений. Данные соединения характеризуются высокой токсичностью, канцерогенной активностью и устойчивостью к естественным процессам разложения, что делает их особенно опасными для экосистем и здоровья человека.

В технологической схеме переработки дизельного топлива в качестве сырья используются фракции 230–300 °С и 300–360 °С, дизельное топливо висбрекинга, бензиновая фракция отгона висбрекинга, дизельное топливо установки УВПМ, а также лёгкий газойль каталитического крекинга. Указанные потоки существенно различаются по своему углеводородному составу и содержанию ароматических соединений, что оказывает значительное влияние на качество и экологические характеристики получаемого дизельного топлива.

Наибольшее содержание ароматических углеводородов характерно для лёгкого газойля каталитического крекинга, что обусловлено механизмами каталитического крекинга, приводящими к образованию значительного количестваmono- и полициклических ароматических структур. Высокая доля ароматики также отмечается в дизельном топливе висбрекинга, формирование которого происходит в условиях термического воздействия, способствующего ароматизации тяжёлых углеводородов и образованию полициклических ароматических соединений.

Фракция 300–360 °С характеризуется повышенным содержанием алкилбензолов и нафталиновых структур по сравнению с более лёгкими дизельными фракциями, что негативно сказывается на экологических показателях топлива. В то же время фракция 230–300 °С содержит меньшую долю ароматических соединений и отличается более высоким содержанием парафиновых и нафтеновых углеводородов. Бензиновая фракция отгона висбрекинга напрямую не определяет ароматичность дизельного топлива, однако при вовлечении в общую схему переработки может оказывать косвенное влияние на его состав.

Таким образом, основными источниками ароматических и полициклических ароматических углеводородов в составе дизельного сырья являются лёгкий газойль каталитического крекинга, дизельное топливо висбрекинга и тяжёлая дизельная фракция 300–360 °С. Это определяет целесообразность применения селективных методов регулирования содержания ароматики, направленных преимущественно на данные потоки, с

целью улучшения экологических и эксплуатационных характеристик конечного продукта.

Основное внимание в работе уделено процессу гидродепарафинизации, так как именно на данном этапе протекают реакции, влияющие на структурный состав углеводородов и содержание ароматических соединений в дизельном топливе. Ароматические углеводороды в наибольшей степени присутствуют в тяжёлых дизельных фракциях, продуктах висбреинга и лёгком газоиле каталитического крекинга. Их повышенное содержание негативно сказывается на экологических показателях топлива, ухудшает показатели сгорания и способствует увеличению выбросов вредных веществ.

В процессе гидродепарафинизации происходит частичное снижение содержания ароматических соединений, насыщение парафинов и олефинов водородом, а также изменение структуры длинноцепочечных углеводородов за счёт реакций изомеризации. Полное удаление ароматических соединений является технологически и экономически нецелесообразным, поскольку часть ароматических компонентов обеспечивает необходимую плотность, энергетическую ценность и смазывающие свойства дизельного топлива. Таким образом, целью процесса является не полное удаление ароматики, а оптимизация её содержания для достижения требуемого баланса между экологическими и эксплуатационными характеристиками продукта.

Ароматические соединения, входящие в состав нефтяных топлив, играют важную роль в обеспечении их эксплуатационных характеристик. Однако их содержание должно быть строго регламентировано в связи с их негативным влиянием на окружающую среду. Например, бензол, толуол и ксиолы (БТК) широко используются в качестве компонентов топлива, но их высокая летучесть и токсичность требуют поиска эффективных методов удаления.

В дизельном топливе ароматические соединения, включая БТК, присутствуют в меньших количествах, чем в бензине, но оказывают значительное влияние на свойства топлива. Они повышают плотность и способствуют смазывающим свойствам, улучшая работу топливной аппаратуры, а также оказывают влияние на показатели цетанового числа и температуру фильтруемости. Вместе с тем, их присутствие приводит к увеличению содержания вредных веществ при сгорании, росту выбросов CO, NO<sub>x</sub> и сажи, а также повышает канцерогенную нагрузку на окружающую среду.

Поэтому в процессе глубокой переработки дизельного топлива часть ароматических соединений необходимо частично удалять, чтобы достичь оптимального баланса между эксплуатационными свойствами и экологическими требованиями. Полное удаление ароматики нежелательно, так как это может ухудшить смазывающие свойства, снизить плотность и негативно повлиять на цетановое число, снижая эксплуатационные характеристики топлива.

Современные подходы к очистке нефтяных топлив включают адсорбционные, экстракционные и каталитические методы. Однако многие из этих технологий характеризуются высокой стоимостью, сложностью внедрения и значительным энергопотреблением.

В этом контексте глубокие эвтектические растворители (ГЭР) рассматриваются не как основной способ очистки, а как вспомогательный инструмент, применяемый в составе существующей перерабатывающей установки для достижения и улучшения целевых показателей качества и экологической безопасности топлива.

ГЭР представляют собой смеси двух или более компонентов, которые при смешивании образуют стабильную жидкость с уникальными физико-химическими свойствами, включая низкую токсичность, биоразлагаемость и высокую селективность по отношению к ароматическим соединениям.

Использование глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) открывает дополнительные возможности для повышения экологической безопасности процессов переработки нефтяных топлив. В рамках существующей установки ЛК-6У ГЭР могут применяться как вспомогательный инструмент для селективного извлечения ароматических соединений, таких как бензол, толуол и ксиолы, что позволяет улучшить показатели качества и экологичности топлива без замены основного технологического оборудования. Благодаря своей низкой токсичности, биоразлагаемости и высокой селективности, а также простоте синтеза, ГЭР представляют собой удобное дополнение к существующим процессам и могут быть интегрированы в промышленное производство с минимальными затратами [1].

Целью данной работы является исследование возможностей внедрения глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) в процесс переработки нефтяного топлива на ПКОП. Задачи исследования включают:

-Изучение физико-химических свойств ГЭР и их взаимодействия с ароматическими соединениями, а также с другими нежелательными компонентами дизельного топлива, таким как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), серосодержащие соединения и кислородсодержащие соединения, которые ухудшают экологические показатели и эксплуатационные свойства топлива.

-Анализ эффективности селективного извлечения ароматических и полярных компонентов из дизельного топлива фракции С-300, поступающего с Шымкентского НПЗ (ПКОП), с использованием глубоких эвтектических растворителей (ГЭР).

-Разработка рекомендаций по оптимизации процесса очистки.

-Разработка плана внедрения использования ГЭР на заводе с минимальными изменениями технологической схемы, без капитальных вложений и остановки работы установки.

Настоящая работа направлена на создание экологически безопасной и экономически эффективной технологии очистки дизельного топлива, которая позволит снизить уровень загрязнения окружающей среды и одновременно

повысить качество конечного продукта. Особое внимание уделяется снижению содержания ароматических соединений, таких как бензол, толуол, ксиолы и полициклические ароматические углеводороды, которые, несмотря на свою роль в обеспечении эксплуатационных характеристик топлива, оказывают негативное влияние на экологические показатели и здоровье человека.

В работе рассматривается возможность внедрения глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) в существующий технологический процесс переработки на Шымкентском НПЗ (ПКОП, Цех 1). ГЭР используются как вспомогательный инструмент для селективного извлечения ароматических и полярных соединений из дизельного топлива фракции С-300, улучшая показатели качества и экологичности топлива без капитальных изменений оборудования и остановки установки.

В рамках исследования анализируются физико-химические свойства ГЭР, механизмы их взаимодействия с ароматическими и полярными компонентами дизельного топлива, а также эффективность процесса гидродепарафинизации, который обеспечивает частичное насыщение парафинов и олефинов водородом, изменение структуры длинноцепочечных углеводородов и оптимизацию содержания ароматических соединений.

Разработка предложенного решения ориентирована на минимизацию воздействия на окружающую среду, повышение эксплуатационных характеристик топлива (плотность, цетановое число, температура фильтруемости), а также на создание экономически целесообразного и технологически реализуемого подхода для промышленного применения. Полученные результаты могут быть использованы как в научных исследованиях, так и в промышленной практике для повышения экологической устойчивости процессов переработки нефтепродуктов [3].

## 1 Основная часть

### 1.1 Классификация ароматических соединений

Ароматические соединения представляют собой органические вещества, содержащие в своей структуре одно или несколько ароматических колец. Они играют ключевую роль в составе нефтяного топлива, влияя на его физико-химические свойства и эксплуатационные характеристики [1-3]. Основные типы ароматических соединений, встречающихся в нефтяных топливах, включают:

**Бензол:** Основноеmonoциклическое ароматическое соединение, обладающее высокой летучестью. Бензол повышает октановое число топлива, но его токсичность и канцерогенные свойства делают необходимым строгий контроль его содержания [2].

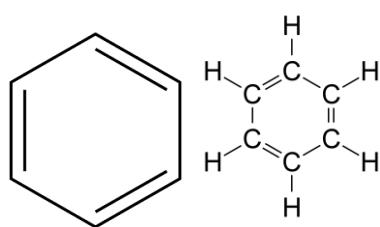


Рисунок 1 – Изображение формулы бензола

**Толуол:** Соединение с более высокой плотностью энергии, чем бензол, широко используется в качестве октаноповышающего компонента.

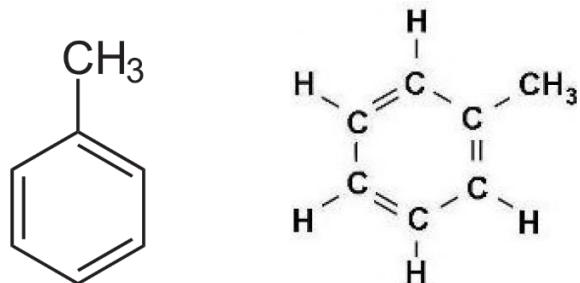
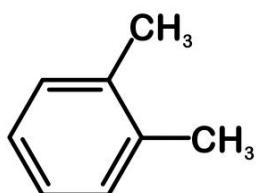


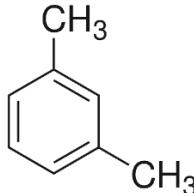
Рисунок 2 – Изображение формулы толуола

*Ксилолы (орт-, мета-, пара-изомеры):* Важные компоненты топлива, обеспечивающие стабильность горения и энергетическую эффективность.

Орто ксилол:



Мета ксилол:



Пара ксилол:

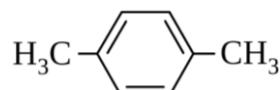


Рисунок 3 – Изображение формулы Орто, Мета, Пара ксилола

*Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ):* Сложные соединения, содержащие несколько конденсированных ароматических колец. Они обладают высокой термической устойчивостью и используются для повышения плотности топлива [4].

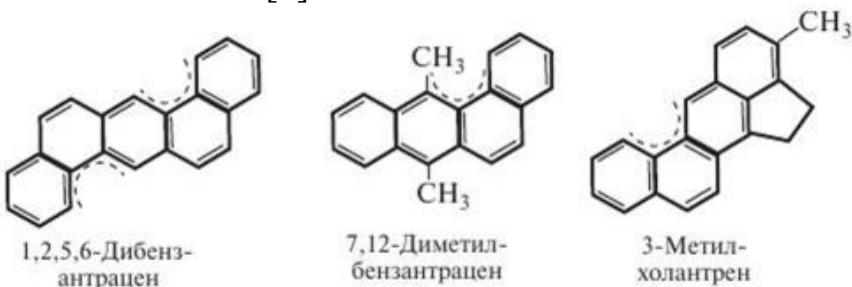


Рисунок 4 – Изображение ПАУ

## 1.2 Экологическое воздействие и токсичность

Ароматические соединения, присутствующие в составе нефтяных топлив, оказывают отрицательное влияние на их экологические характеристики и представляют потенциальную опасность для здоровья человека, что обуславливает необходимость регулирования их содержания. Бензол относится к канцерогенным веществам и при длительном воздействии способен вызывать серьёзные нарушения кроветворной системы, включая развитие онкологических заболеваний. Толуол и ксилолы обладают нейротоксическим действием и при повышенных концентрациях негативно влияют на центральную нервную систему, вызывая функциональные нарушения.

В составе дизельного топлива ароматические углеводороды присутствуют в ограниченных количествах и не подлежат полному удалению, поскольку часть ароматической фракции необходима для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств продукта. Вместе с тем избыточное содержание ароматических соединений, особенно полициклических ароматических углеводородов, характерных для тяжёлых и вторичных

дизельных компонентов, приводит к ухудшению экологических показателей топлива и увеличению вредных выбросов при его сгорании. В связи с этим актуальной задачей переработки нефтяных топлив является не полное удаление ароматических соединений, а оптимизация их содержания до технологически и экологически обоснованных уровней, в том числе за счёт применения вспомогательных селективных методов очистки.

Ароматические соединения, входящие в состав нефтяных топлив, оказывают негативное воздействие на окружающую среду на всех этапах их обращения. При попадании в почву и водную среду данные соединения способны проникать в грунтовые воды и сохраняться в них в течение длительного времени вследствие низкой скорости биологического разложения. Это приводит к устойчивому загрязнению водных ресурсов и затрудняет процессы естественного восстановления экосистем.

В атмосферу ароматические углеводороды поступают за счёт испарения и процессов сгорания топлива. Их высокая летучесть и химическая активность способствуют образованию фотохимического смога и ухудшению качества атмосферного воздуха, особенно в районах с высокой концентрацией транспорта и промышленного производства.

Биологическое воздействие ароматических соединений обусловлено их способностью к накоплению в живых организмах и передаче по пищевым цепям, что повышает риск токсического воздействия на животных и человека. Кроме того, данные соединения оказывают угнетающее влияние на растительные организмы, нарушая работу корневой системы и метаболические процессы, что приводит к снижению устойчивости растений и деградации почвенного покрова.

Таким образом, несмотря на то что ароматические соединения в определённой степени участвуют в формировании эксплуатационных свойств нефтяных топлив, их избыточное содержание требует контроля и регулирования. Это обуславливает необходимость применения технологических решений, направленных на оптимизацию содержания ароматических углеводородов в топливе с целью снижения экологического и токсикологического воздействия при сохранении требуемых качественных характеристик продукта [6].

### **1.3 Глубокие эвтектические растворители (ГЭР)**

Глубокие эвтектические растворители (ГЭР) представляют собой жидкие системы, образованные при смешивании двух или более компонентов, способных к образованию устойчивой сети водородных связей. Как правило, такие системы включают акцептор водородной связи (НВА), например четвертичные аммониевые соли или цвиттерионные соединения, и донор водородной связи (НВД), к которым относятся многоатомные спирты, амиды

и другие полярные органические вещества. В результате межмолекулярных взаимодействий формируется эвтектическая смесь, температура плавления которой существенно ниже температур плавления исходных компонентов, что обеспечивает её жидкое состояние при умеренных температурах.

Формирование ГЭР не является химической реакцией в классическом понимании, а представляет собой физико-химический процесс ассоциации компонентов за счёт водородных связей и электростатических взаимодействий. Благодаря этому ГЭР сохраняют стабильность состава и свойств в широком температурном диапазоне, что делает их пригодными для применения в многофазных и гетерогенных системах.

ГЭР характеризуются рядом свойств, представляющих практический интерес для технологических процессов: низкой летучестью, негорючестью, высокой термической и химической стабильностью, а также выраженной растворяющей способностью по отношению к полярным и ароматическим соединениям. Эти особенности позволяют рассматривать ГЭР в качестве альтернативы традиционным органическим растворителям, особенно в тех случаях, когда требуется снижение экологической и промышленной опасности процесса.

По сравнению с молекулярными органическими растворителями, ГЭР обладают повышенной безопасностью применения, что связано с их низкой испаряемостью и сниженным риском образования взрывоопасных смесей. Важными параметрами, влияющими на эффективность использования ГЭР, являются вязкость и плотность, поскольку они определяют интенсивность массообмена между фазами. При снижении температуры вязкость большинства ГЭР возрастает, однако многие системы сохраняют приемлемые реологические характеристики в диапазоне температур, характерных для экстракционных процессов очистки нефтяных фракций.

Существенным преимуществом ГЭР является простота их получения. В большинстве случаев синтез осуществляется путём смешивания компонентов в заданном молярном соотношении при умеренной температуре и атмосферном давлении, без применения катализаторов, инертной среды или многостадийной очистки. Используемые компоненты, такие как многоатомные спирты, амиды или бетаиновые соединения, являются доступными и относительно недорогими, что повышает экономическую целесообразность применения ГЭР в промышленной практике.

В последние годы ГЭР рассматриваются как перспективный класс растворителей для эколого-ориентированных технологий, включая процессы селективной экстракции компонентов из нефтяных фракций. Их свойства позволяют использовать ГЭР не в качестве замены основных процессов переработки, а как вспомогательный инструмент для регулирования состава топлива и улучшения его экологических характеристик без существенного изменения существующих технологических схем.

Классификация и особенности глубоких эвтектических растворителей. Глубокие эвтектические растворители могут быть классифицированы в зависимости от природы компонентов, участвующих в их формировании. Наиболее распространённые системы включают сочетания четвертичных аммониевых солей, цвиттерионных соединений, многоатомных спиртов, амидов и органических кислот. В зависимости от типа взаимодействующих компонентов различают ГЭР, образованные на основе солей и нейтральных соединений, а также системы, включающие органические доноры и акцепторы водородной связи.

На практике наибольшее распространение получили ГЭР на основе холинхlorида, глицерина, мочевины и многоатомных спиртов, что связано с доступностью данных веществ и простотой получения соответствующих эвтектических систем. Вместе с тем в последние годы возрастает интерес к альтернативным системам, включающим бетаиновые соединения и диолы, обладающие более выраженной селективностью по отношению к ароматическим и полициклическим ароматическим углеводородам.

Несмотря на сходство некоторых физико-химических свойств глубоких эвтектических растворителей и ионных жидкостей, данные классы соединений принципиально различаются по механизму формирования и экономическим характеристикам. В отличие от ионных жидкостей, синтез которых часто требует многостадийных реакций и дорогостоящих реагентов, ГЭР формируются путём простого физико-химического смешивания компонентов. Это обеспечивает их более низкую стоимость, доступность и удобство масштабирования, что особенно важно при рассмотрении возможности внедрения данных систем в существующие технологические процессы переработки нефтепродуктов.

ГЭР характеризуются высокой гибкостью состава, что позволяет целенаправленно подбирать их свойства путём изменения природы компонентов и их молярного соотношения. Такая модифицируемость является ключевым преимуществом при разработке экстракционных систем, ориентированных на селективное извлечение определённых групп соединений. В контексте переработки дизельного топлива это позволяет адаптировать состав ГЭР под преимущественное извлечение ароматических и полициклических ароматических углеводородов при минимальном воздействии на парафиновые и нафтеновые компоненты.

Следует отметить, что в ряде исследований ГЭР рассматриваются как экстрагенты для удаления серосодержащих соединений. Однако в условиях действующих нефтеперерабатывающих производств такие функции традиционно выполняются процессами гидроочистки. В связи с этим в рамках настоящей работы ГЭР рассматриваются не как замена существующих процессов, а как вспомогательный инструмент, направленный на регулирование содержания ароматических соединений и улучшение экологических характеристик дизельного топлива.

Таким образом, совокупность таких свойств, как простота синтеза, доступность компонентов, возможность целенаправленного регулирования физико-химических характеристик и селективность по отношению к ароматическим соединениям, делает глубокие эвтектические растворители перспективными для использования в качестве дополнительного этапа очистки нефтяных фракций в условиях промышленной переработки [5].

#### **1.4 Особенности взаимодействия ГЭР с органическими соединениями**

Эффективность применения глубоких эвтектических растворителей при очистке нефтяных фракций определяется особенностями их физико-химического взаимодействия с органическими соединениями. В отличие от катализитических процессов, взаимодействие ГЭР с компонентами топлива носит нехимический характер и основано на совокупности межмолекулярных взаимодействий, обеспечивающих селективное извлечение целевых соединений из сложных углеводородных смесей.

Ключевую роль в механизме взаимодействия играют водородные связи, формирующиеся между донорно-акцепторными центрами компонентов ГЭР и ароматическими молекулами. Ароматические и полициклические ароматические углеводороды характеризуются повышенной поляризумостью  $\pi$ -электронной системы, что способствует их предпочтительному взаимодействию с полярной средой ГЭР по сравнению с парафиновыми и нафтеновыми углеводородами дизельного топлива.

Дополнительный вклад в процесс экстракции вносят электростатические и диполь-дипольные взаимодействия, обусловленные наличием ионных или цвиттерионных компонентов в составе ГЭР. Такие взаимодействия усиливают сродство растворителя к ароматическим структурам, особенно к конденсированным системам, включая нафталиновые и другие полициклические ароматические соединения. В результате ароматические компоненты preferentially переходят в фазу ГЭР, тогда как неполярные углеводороды в основном остаются в дизельной фазе.

Важным механизмом является также солюбилизация, при которой ароматические молекулы стабилизируются в структуре ГЭР за счёт специфического микросредового окружения. Этот эффект способствует удержанию извлечённых соединений в экстрагенте и предотвращает их обратный переход в углеводородную фазу. При этом взаимодействие не сопровождается разрушением молекул топлива или изменением его химической структуры, что является принципиальным отличием экстракционного подхода от процессов гидрирования или крекинга.

Следует отметить, что эффективность взаимодействия ГЭР с органическими соединениями существенно зависит от состава растворителя,

молярного соотношения компонентов и температуры процесса. Повышение температуры, как правило, снижает вязкость ГЭР и улучшает массообмен между фазами, однако чрезмерный нагрев может приводить к снижению селективности. В связи с этим для практического применения ГЭР важным является подбор таких условий, при которых достигается оптимальный баланс между интенсивностью экстракции и селективностью по отношению к ароматическим углеводородам.

Таким образом, взаимодействие глубоких эвтектических растворителей с ароматическими соединениями дизельного топлива основывается на совокупности водородных, электростатических и солюбилизационных механизмов, обеспечивающих селективное извлечение наиболее экологически нежелательных компонентов. Это позволяет рассматривать ГЭР как эффективный вспомогательный инструмент для регулирования содержания ароматики и улучшения экологических характеристик дизельного топлива без вмешательства в основные химические процессы переработки [7].

## **1.5 Методы регулирования содержания ароматических соединений в нефтяных топливах**

Состав нефтяных фракций, используемых для получения дизельного топлива, характеризуется высокой сложностью и включает насыщенные, ароматические и нафтеновые углеводороды, а также полярные компоненты, присутствующие преимущественно в тяжёлых и вторичных потоках. Содержание ароматических и полициклических ароматических углеводородов в дизельном сырье в значительной степени определяется происхождением фракции и условиями её формирования в ходе первичных и вторичных процессов переработки. Именно данные компоненты в наибольшей степени влияют на экологические характеристики и показатели сгорания дизельного топлива.

В промышленной практике регулирование состава дизельного топлива осуществляется преимущественно за счёт каталитических процессов, прежде всего гидроочистки и гидродепарафинизации. Эти процессы позволяют удалять гетероатомные соединения и частично трансформировать углеводородный состав топлива. Однако при увеличении доли вторичных компонентов и росте производственной нагрузки возможности данных процессов по снижению содержания ароматических соединений оказываются ограниченными, что обуславливает необходимость поиска дополнительных селективных методов воздействия на состав топлива.

В этом контексте глубокие эвтектические растворители рассматриваются как вспомогательный инструмент, направленный на селективное извлечение ароматических и полициклических ароматических углеводородов из дизельных фракций. Применение ГЭР основано на их

способности избирательно взаимодействовать с ароматическими структурами за счёт физико-химических механизмов, не затрагивая при этом основную углеводородную матрицу топлива. Такой подход позволяет корректировать состав дизельного топлива без замены или радикальной перестройки существующих технологических процессов.

Следует отметить, что ГЭР не предназначены для замены процессов гидроочистки и не рассматриваются в качестве метода удаления серосодержащих соединений в условиях действующих нефтеперерабатывающих производств. Их применение целесообразно именно на этапе регулирования содержания ароматических компонентов, в том числе наиболее экологически нежелательных полициклических ароматических углеводородов. Эффективность экстракции определяется составом ГЭР, молярным соотношением компонентов, температурными условиями и интенсивностью массообмена между фазами.

Важным технологическим преимуществом ГЭР является возможность их регенерации и повторного использования. Восстановление экстракционных свойств достигается путём разрушения слабых межмолекулярных взаимодействий между ГЭР и извлечёнными ароматическими соединениями, как правило, за счёт изменения температурных условий процесса, при сохранении структуры самого растворителя.

По сравнению с альтернативными методами регулирования содержания ароматических соединений, такими как адсорбционные, экстракционные с применением традиционных растворителей и каталитические методы, ГЭР представляют собой сбалансированное решение, сочетающее селективность, экологическую безопасность и относительную простоту реализации [8].

## **1.6 Преимущества глубоких эвтектических растворителей по сравнению с традиционными методами**

Глубокие эвтектические растворители обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами регулирования содержания ароматических соединений в нефтяных топливах, что делает их перспективными для применения в составе экологически ориентированных и ресурсосберегающих технологий. В отличие от адсорбционных методов, использование ГЭР не требует применения твёрдых адсорбентов и сложных процедур их регенерации, а процесс экстракции осуществляется в жидкой фазе, что упрощает технологическую реализацию и повышает управляемость процесса.

По сравнению с традиционными экстракционными методами, основанными на применении летучих и токсичных органических растворителей, ГЭР характеризуются низкой летучестью, пониженной токсичностью и отсутствием значимых выбросов в атмосферу. Это снижает

экологические и производственные риски, а также упрощает вопросы хранения, обращения и утилизации экстрагентов. Дополнительным преимуществом является возможность подбора состава ГЭР с заданными физико-химическими свойствами, что позволяет целенаправленно повышать селективность к ароматическим и полициклическим ароматическим углеводородам.

В отличие от катализитических методов переработки, применение ГЭР не требует высоких температур, давления водорода, дорогостоящих катализаторов и сложной аппаратурной обвязки. Использование ГЭР осуществляется в мягких температурных условиях и не затрагивает основные химические превращения углеводородов, что позволяет рассматривать данный подход как вспомогательный этап, интегрируемый в существующие технологические схемы без существенных капитальных затрат и остановки производства.

Перспективы использования ГЭР связаны с возможностью их адаптации под конкретный состав дизельного сырья за счёт изменения природы компонентов и их молярного соотношения. Ведущие исследования в данной области направлены на разработку специализированных эвтектических систем, ориентированных на селективное извлечение наиболее экологически опасных компонентов, прежде всего полициклических ароматических углеводородов, при минимальном воздействии на парафиновые и нафтеновые фракции топлива.

Следует подчеркнуть, что в рамках настоящей работы ГЭР рассматриваются исключительно как экстракционные среды, а не как реагенты или катализитические системы. Их взаимодействие с ароматическими соединениями носит физико-химический характер и не сопровождается протеканием химических реакций или изменением структуры углеводородов. Такой подход обеспечивает сохранение эксплуатационных свойств дизельного топлива и соответствует требованиям промышленной безопасности.

Таким образом, глубокие эвтектические растворители представляют собой технологически и экологически обоснованное решение, сочетающее селективность, безопасность и возможность интеграции в действующие процессы переработки нефтяных топлив. Совокупность указанных преимуществ делает ГЭР перспективным инструментом для повышения экологической устойчивости нефтеперерабатывающих процессов и соответствия современным требованиям к качеству дизельного топлива [9].

## 2 Методология исследования

### 2.1 Преимущества глубоких эвтектических растворителей по сравнению с традиционными методами

Экспериментальные исследования проводились в испытательной лаборатории нефтеперерабатывающего завода ТОО «ПетроКазахстан Ойл Продактс» (ПКОП), расположенного в г. Шымкент. Также исследования проводились в учебной лаборатории университета КазНИТУ имени Сатпаева, город Алматы

Исследовалось дизельное топливо, получаемое из сырьевых потоков цеха № 1, в том числе фракций секции-300, а также смесей, содержащих вторичные дизельные компоненты.

В рамках исследования рассматривалась возможность применения глубоких эвтектических растворителей не как альтернативы действующим технологическим процессам, а как дополнительного инструмента регулирования состава топлива.

Приготовление ГЭР осуществлялось путём смешивания исходных компонентов в заданном молярном соотношении с последующим нагревом до 50-70 градусов по цельсию в зависимости от состава и попыток по синтезу удачного образца, перемешивалось магнитной мешалкой при атмосферном давлении 300-500 оборотов в минуту до получения однородной прозрачной жидкости. Синтез ГЭР оказался достаточно легким процессом так как не требовал наличия аппаратов, катализаторов, особенного давления или повышенной температуры, что является большим плюсом так как не требует капитальных затрат средств и энергии.

Таблица 1 — Список ГЭР

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| № 1  | Бетаин + Пропиленгликоль (1:4)      |
| № 3  | Бетаин + Глицерин (1:3)             |
| № 5  | Бетаин + Глицерин (1:5)             |
| № 7  | Бетаин + Этиленгликоль (1:3)        |
| № 9  | Бетаин + Этиленгликоль (1:5)        |
| № 11 | Холинхлорид + Пропиленгликоль (1:2) |
| № 13 | Холинхлорид + Пропиленгликоль (1:4) |
| № 15 | Холинхлорид + Глицерин (1:2)        |
| № 17 | Холинхлорид + Глицерин (1:3)        |

После синтеза ГЭР отстаивался в темном помещении в закрытых колбах при комнатной температуре в течении 24 часов.

Смешивание с сырьем дизельного топлива производилось при температуре 65 градусов цельсия на магнитной мешалке при мощности 400 оборотов в минуту. Смешивание проходило 40 минут.

После смешивания ГЭР и сырья дизельного топлива образцы были закупорены и оставлены в теплом помещении отстаиваться в течении 24 часов.

По прошествию данного времени наблюдалось отчетливое разделение 2-х фаз дизеля и более плотного ГЭР. На рисунке 5 разделение фаз.

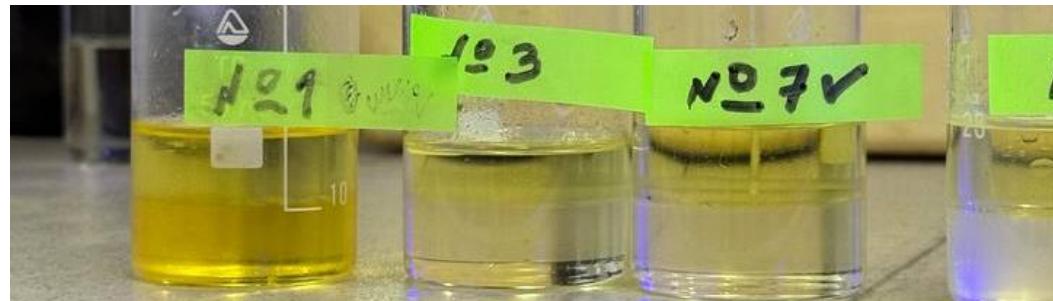


Рисунок 5 – смесь ГЭР и сырья дизельного топлива

После отстаивания мы разделили 2 фазы жидкости с помощью использовали делительную воронку так как жидкости являются несмешивающимися.

Было смешано 50 мл ГЭР и 50 мл дизельного сырья, после наших выше, описанных процедур удалось вывести 40 мл очищенного ГЭР-ом сырья дизельного топлива

Результат оценивали на основе, анализов. Которые были проведены на аппаратах УФ и ИК спектроскопии [10].

## 2.2 УФ спектроскопия

Спектр получен методом UV–Vis спектроскопии с регистрацией оптической плотности в диапазоне длин волн 280–1100 нм.

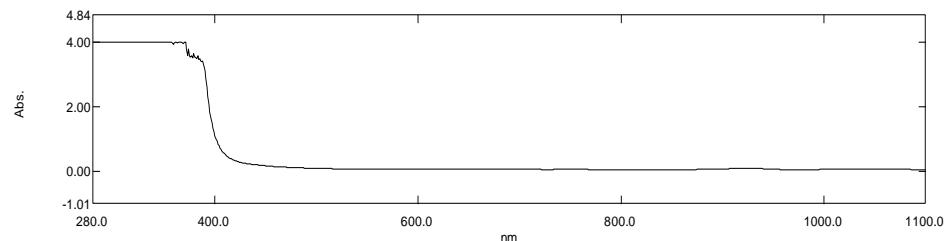


Рисунок 6 – УФ спектр дизельного топлива до смешивания

На графике видно, что высокая плотность в диапазоне длин волн 280–370, что указывает на присутствие в сырье дизельного топлива значительного количества ароматических соединений.

В области 370–420 фиксируется резкое снижение оптической плотности, свидетельствующее об отсутствии тяжёлых и высококонденсированных ароматических соединений.

В диапазоне длин волн выше 420 поглощение практически отсутствует, что указывает на отсутствие окрашенных, смолистых и асфальтеновых компонентов.

Таким образом, сырьё характеризуется наличием преимущественно лёгкой ароматической фракции при отсутствии тяжёлых высокомолекулярных примесей. В диапазоне длин волн 280–360 значение оптической плотности достигает предельного уровня измерений прибора, что указывает на насыщение сигнала и невозможность дальнейшей регистрации роста поглощения.

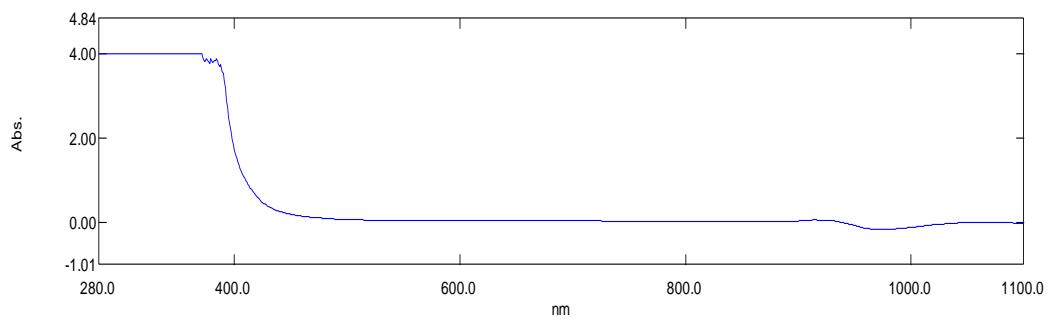


Рисунок 7 – УФ спектр дизельного топлива после смещивания с ГЭР №1

После обработки дизеля ГЭР №1 в области 280–330 сохраняется высокая интенсивность поглощения.

Это указывает на частичное сохранение моно ароматических углеводородов (алкил бензолы, этил- и пропил бензолы). Снижение плотности относительно исходного дизеля присутствует, но носит умеренный характер, что говорит о слабой селективности ГЭР к лёгкой ароматике. В интервале 330–380 наблюдается плавный спад оптической плотности, однако поглощение остаётся заметным.

Диапазон характерен для бициклических ароматических углеводородов (нафталин и его производные), а также бензотиофенов. 380–420 спад поглощения происходит постепенно и не достигает минимальных значений сразу, что указывает на частичное сохранение полициклических ароматических соединений низкой конденсации, а также окрашенных сероорганических компонентов.

После 420 спектр выравнивается. Полного обнуления сигнала не наблюдается, что указывает на недостаточную глубину очистки.

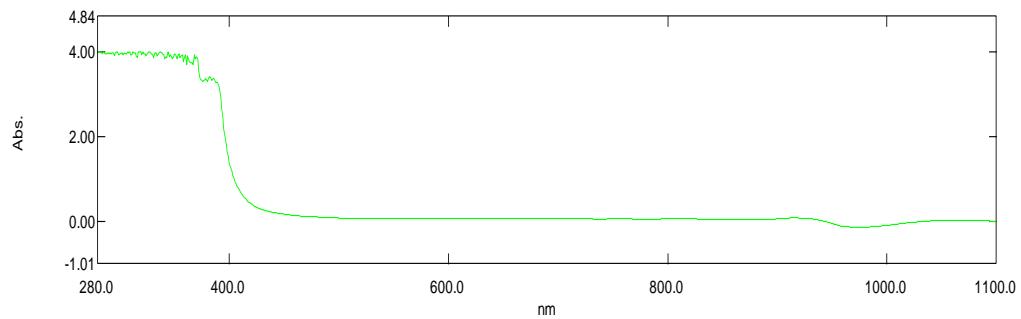


Рисунок 8 – УФ спектр дизельного топлива после смещивания с ГЭР №3

После обработки дизельного топлива ГЭР №3 в диапазоне 280–360 наблюдается дальнейшее снижение интенсивности поглощения по сравнению как с исходным сырьём и с ГЭР №1.

Более выраженное уменьшение содержания моно- и бициклических ароматических углеводородов. В диапазоне 360–420 спад плотности происходит быстрее, что свидетельствует о снижении доли соединений с более развитой ароматической системой. В области длин волн выше 420 нм поглощение отсутствует, что подтверждает отсутствие тяжёлых полиароматических, смолистых и окрашенных компонентов.

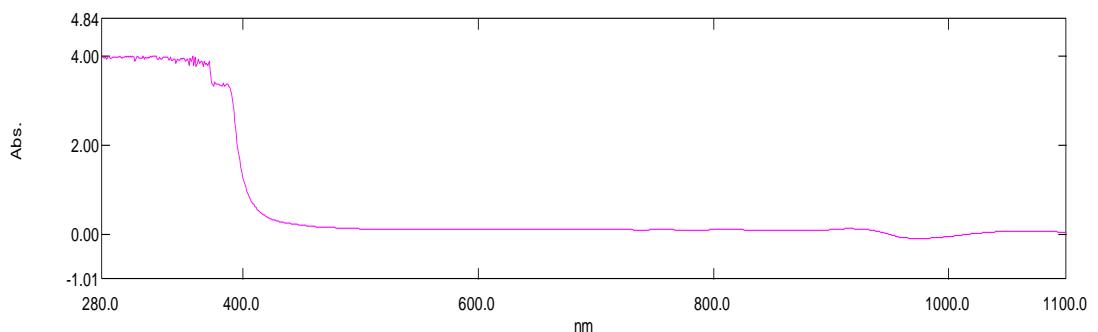


Рисунок 9 – УФ спектр дизельного топлива после смещивания с ГЭР №5

После обработки дизельного топлива ГЭР №5 в диапазоне 280–360 наблюдается выраженное снижение по сравнению с исходным сырьём, а также с образцами после ГЭР №1 и ГЭР №3.

Это свидетельствует о более глубокой очистке. В области 360–420 спад оптической плотности происходит быстрее, что указывает на минимизацию компонентов с более развитой ароматической системой.

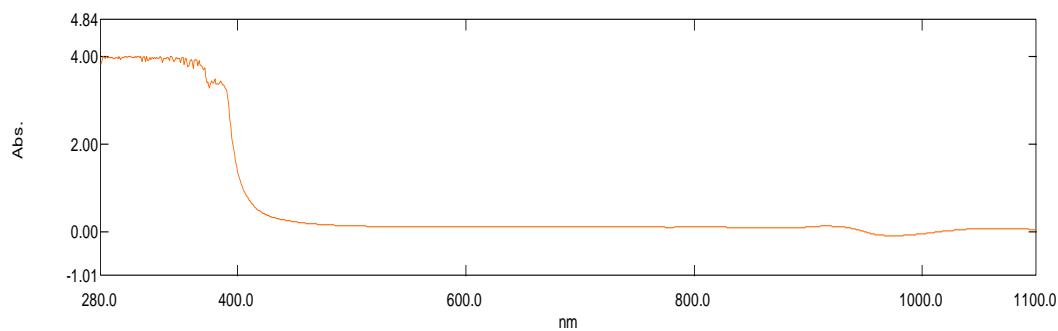


Рисунок 10 – УФ спектр дизельного топлива после смещивания с ГЭР №7

ГЭР №7, в диапазоне 280–360 наблюдается дальнейшее снижение по сравнению с образцами после ГЭР №1, №3 и №5. Это указывает на дополнительное уменьшение содержания ароматики. В области 360–420 спад оптической происходит наиболее резко.

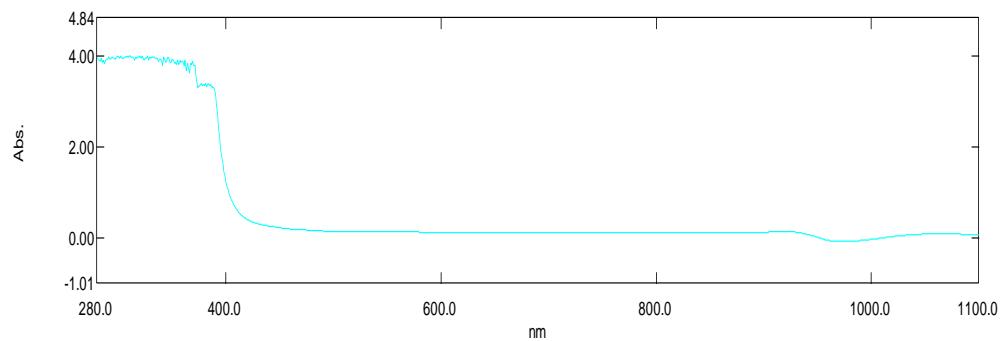


Рисунок 11 – УФ спектр дизельного топлива после смещивания с ГЭР №9

ГЭР №9 в диапазоне 280–350 наблюдается минимальная интенсивность ультрафиолетового поглощения по сравнению со всеми предыдущими образцами, что говорит о том, что наиболее глубокая очистка. В диапазоне 350–400 спад оптической плотности происходит резко и завершается при более низких значениях абсорбции, чем для ГЭР №1, №3, №5 и №7, что указывает на практически полное удаление соединений с расширенной ароматической системой.

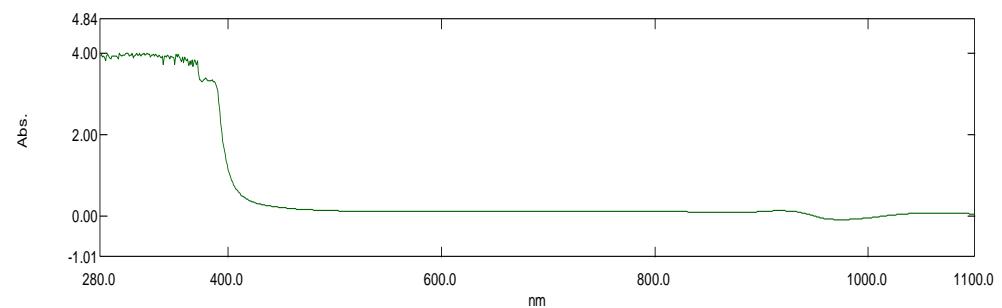


Рисунок 12 – УФ спектр дизельного топлива после смещивания с ГЭР №11

После обработки дизельного топлива ГЭР №11 в диапазоне 280–340 нм наблюдается наиболее низкая и сглаженная интенсивность ультрафиолетового поглощения среди всех исследованных образцов, что свидетельствует о максимальном снижении содержания моно- и бициклических ароматических углеводородов (алкилбензолы, нафталиновые производные), а также связанной с ними ароматической сероорганики (тиофены, бензотиофены). В диапазоне 340–390 нм спад оптической плотности происходит резко и достигает минимальных значений, что указывает на практически полное удаление соединений с расширенной  $\pi$ -системой. В области длин волн выше 390–420 нм поглощение отсутствует, что подтверждает отсутствие тяжёлых полиароматических, смолистых и окрашенных компонентов. Полученные данные указывают на наивысшую эффективность ГЭР №11 по снижению ароматической и сероорганической составляющей дизельного топлива.

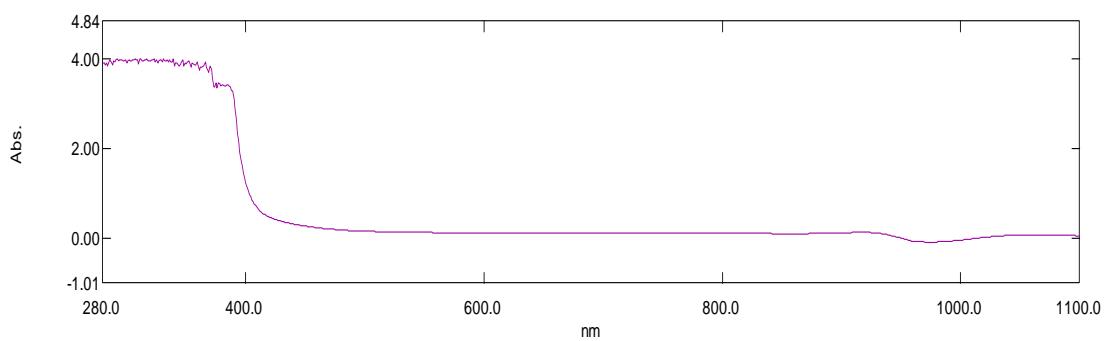


Рисунок 13 – УФ спектр дизельного топлива после смешивания с ГЭР №13

После обработки дизельного топлива ГЭР №13 в диапазоне 280–340 нм наблюдается выраженное снижение и сглаживание интенсивности ультрафиолетового поглощения по сравнению с исходным дизелем, что указывает на уменьшение содержания моно- и бициклических ароматических углеводородов (алкилбензолы, нафталиновые производные), а также ассоциированной с ними ароматической сероорганики (тиофены, бензотиофены). В диапазоне 340–390 нм оптическая плотность снижается резко и достигает близких к фоновым значений, что свидетельствует о существенном удалении соединений с расширенной  $\pi$ -электронной системой. В области длин волн выше 390–420 нм поглощение практически отсутствует, что подтверждает отсутствие тяжёлых полиароматических, смолистых и окрашенных компонентов. Полученные данные указывают на высокую эффективность ГЭР №13 по снижению ароматической и сероорганической составляющей дизельного топлива, уступающую наиболее эффективным образцам, но превосходящую менее активные ГЭР.

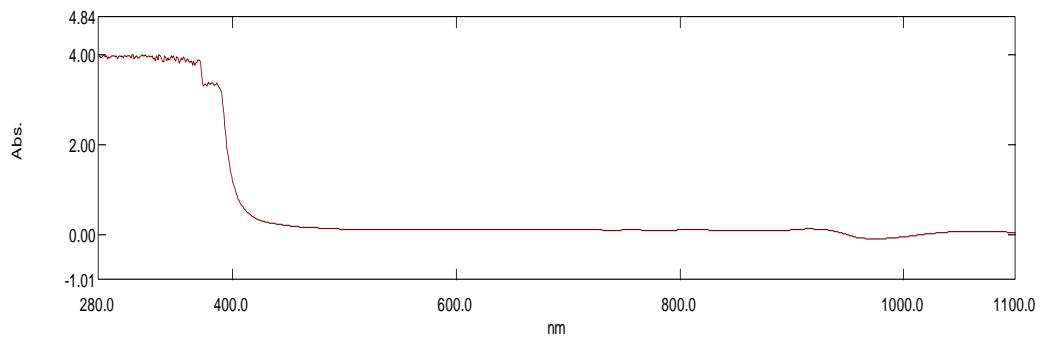


Рисунок 14 – УФ спектр дизельного топлива после смещивания с ГЭР №15

После обработки дизельного топлива ГЭР №15 в ультрафиолетовой области 280–330 нм сохраняется относительно высокая оптическая плотность по сравнению с наиболее эффективными образцами (ГЭР №9 и №11), что указывает на неполное удаление моноциклических ароматических углеводородов (алкилбензолы, толуольные и ксилольные производные), а также части тиофеновой сероорганики. В диапазоне 330–380 нм наблюдается выраженный спад поглощения, однако он менее резкий, чем для ГЭР №11, что свидетельствует о частичном сохранении бициклических ароматических соединений (нафталин и его алкилпроизводные, бензотиофены). В области 380–420 нм оптическая плотность приближается к нулю, однако фиксируется слабый остаточный сигнал, что указывает на следовые количества соединений с расширенной  $\pi$ -системой, включая лёгкие полиароматические и смолистые компоненты. При длинах волн выше 420–450 нм поглощение практически отсутствует, что подтверждает эффективное удаление тяжёлых полиароматических, окрашенных и высококонденсированных структур. В целом ГЭР №15 демонстрирует среднюю эффективность экстракции ароматической и сероорганической фракций, уступая ГЭР №9 и №11, но превосходя менее селективные системы, что делает его перспективным, но не оптимальным вариантом для глубокой деароматизации дизельного топлива.

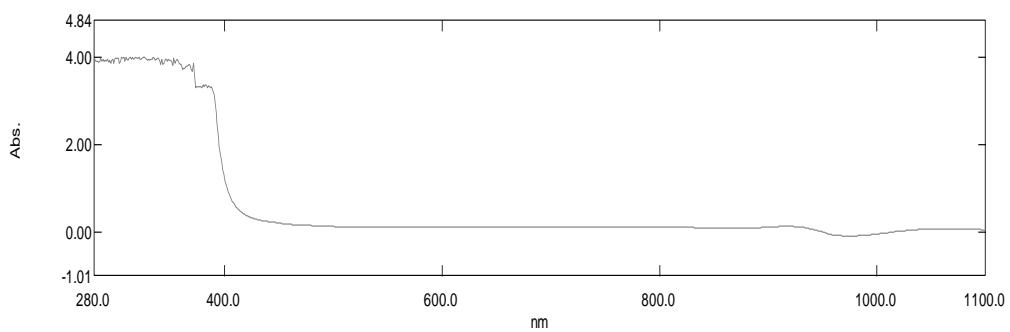


Рисунок 15 – УФ спектр дизельного топлива после смещивания с ГЭР №17

Если говорить коротко, то согласно УФ спектроскопии можно оценить эффективность очищения ГЭР в таблице по формуле:

$$\eta, \% = (X_{\text{исх}} - X_{\text{после}}) / X_{\text{исх}} \times 100 \quad (1)$$

Таблица 2 — Эффективность ГЭР по длинам волн

| ГЭР | 280–320 нм       | 320–360 нм     | 360–400 нм       | >400 нм  | Общая эффективность, % |
|-----|------------------|----------------|------------------|----------|------------------------|
|     | моноароматика, % | биароматика, % | полиароматика, % | смолы, % |                        |
| №1  | 0–5              | 0–5            | 0                | 0        | ≤5                     |
| №3  | 15–20            | 20–25          | 15               | 10       | ~20                    |
| №5  | 25–30            | 30–35          | 30               | 20       | ~30                    |
| №7  | 20–25            | 25             | 20               | 15       | ~25                    |
| №9  | 35–40            | 45             | 40               | 30       | ~40–45                 |
| №11 | 55–60            | 65–70          | 70–75            | >80      | ~65–70                 |
| №13 | 25               | 30             | 25               | 15       | ~25–30                 |
| №15 | 45–50            | 55–60          | 60–65            | 60       | ~55–60                 |
| №17 | 40–45            | 50–55          | 55–60            | 55       | ~50–55                 |

После обработки дизельного топлива ГЭР №17 в диапазоне 280–340 нм наблюдается пониженная и более сглаженная интенсивность УФ-поглощения по сравнению с большинством исследованных образцов, что свидетельствует о значительном снижении содержания моно- и бициклических ароматических углеводородов (алкилбензолы, нафталиновые производные), а также ассоциированной с ними ароматической сероорганики (тиофены и бензотиофены). В диапазоне 340–390 нм спад оптической плотности выражен резко и достигает близких к нулю значений, что указывает на эффективное удаление соединений с расширенной  $\pi$ -электронной системой. В области длин волн выше 390–420 нм поглощение отсутствует, что подтверждает отсутствие тяжёлых полиароматических, окрашенных и смолистых компонентов. Полученные данные позволяют отнести ГЭР №17 к числу наиболее эффективных растворителей по снижению ароматической и сероорганической фракции дизельного топлива [11-18].

### 2.3 ИК спектроскопия

Спектр получен методом UV–Vis спектроскопии с регистрацией оптической плотности в диапазоне длин волн 280–1100 нм.

Данный метод исследования уже немного другой, он был сделан для того, чтобы подтвердить и дополнить не достающие пики и данные которые не возможно было получить методом UV-Vis спектроскопии. Диапазон длин волн 500–4000  $\text{см}^{-1}$



Рисунок 16 - ИК спектр дизельного топлива до смешивания (EXCEL)

В области 2850–2950 видны интенсивные пики, соответствующие валентным колебаниям C–H связей алифатических углеводородов, что указывает на преобладание парафиновых и нафтеновых структур, формирующих основную матрицу дизельного топлива. В диапазоне 3000–3100 наблюдаются слабые пики, характерные для ароматических C–H связей, что свидетельствует о присутствии ароматических углеводородов в составе дизельного топлива. В области 1600–1500 проявляются выраженные пики, относящиеся к колебаниям C=C связей ароматического кольца, что указывает на наличие моно- и полициклических ароматических соединений, включая алкилбензолы и нафтиловые производные, а также ассоциированной с ними ароматической сероорганики (тиофены, бензотиофены). В диапазоне 1460–1375 фиксируются пики деформационных колебаний, подтверждающие наличие длинноцепочечных алифатических углеводородов, характерных для дизельных фракций.

В области 1300–1000 наблюдаются слабые пики, которые могут быть отнесены к колебаниям C–S связей сероорганических соединений, а также к колебаниям C–C в насыщенных углеводородах. Наличие данных пиков указывает на присутствие сероорганических компонентов в исходном дизельном топливе. В диапазоне 900–700 отмечаются пики внеплоскостных деформационных колебаний C–H ароматических колец, что подтверждает присутствие замещённых ароматических структур в составе топлива. Отсутствие выраженных пиков в области 1700–1800  $\text{см}^{-1}$  свидетельствует о низком содержании кислородсодержащих соединений (карбонильные группы), что подтверждает преимущественно углеводородную природу исследуемого дизельного топлива [35-40].



Рисунок 17 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №1

На графике после обработки ГЭР №1 в диапазоне 2950–2850 наблюдаются выраженные пики валентных колебаний С–Н алифатических  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$ -групп, интенсивность которых по сравнению с исходным дизельным топливом практически не изменяется, что указывает на сохранение основной алифатической матрицы топлива. В области 1600–1500  $\text{см}^{-1}$ , характерной для колебаний С=С ароматических колец, фиксируется лишь незначительное снижение интенсивности пиков относительно исходного образца, что свидетельствует о частичном, но ограниченном удалении ароматических углеводородов. В диапазоне 900–700  $\text{см}^{-1}$ , соответствующем деформационным колебаниям С–Н в ароматических структурах и замещённых бензольных кольцах, форма и интенсивность пиков сохраняются, что указывает на присутствие остаточной ароматической фракции [41-43].

Пики в области 700–600  $\text{см}^{-1}$ , которые могут быть отнесены к колебаниям С–S связей (тиофены, бензотиофены), после обработки ГЭР №1 ослабляются незначительно, что говорит о низкой степени удаления сероорганических соединений.

Сравнение с УФ-спектроскопическими данными показывает, что после обработки ГЭР №1 в диапазоне 280–340 нм сохраняется высокая интенсивность поглощения, характерная для моно- и бициклических ароматических углеводородов и ароматической сероорганики. Это подтверждает, что ГЭР №1 не обеспечивает эффективного удаления соединений с развитой  $\pi$ -сопряжённой системой. Таким образом, ИК-спектроскопия подтверждает выводы, полученные методом УФ-спектроскопии, и показывает, что обработка дизельного топлива ГЭР №1 приводит лишь к незначительным структурным изменениям и не сопровождается существенным снижением содержания ароматических и сероорганических компонентов.



Рисунок 18 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №3

На графике после обработки ГЭР №3 в диапазоне 2950–2850 наблюдаются интенсивные пики валентных колебаний С–Н алифатических  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$ -групп, характерные для углеводородной матрицы дизельного топлива. По сравнению с исходным ИК-спектром интенсивность данных пиков практически не изменяется, что свидетельствует о сохранении алифатической основы топлива [44-50].

В области 1600–1500, соответствующей колебаниям С=С ароматических колец, фиксируется умеренное снижение интенсивности пиков относительно исходного образца, что указывает на частичное удаление ароматических углеводородов. В диапазоне 900–700, характерном для деформационных колебаний С–Н в ароматических структурах и замещённых бензольных кольцах, пики сохраняются, однако их интенсивность несколько ниже по сравнению с исходным дизельным топливом, что свидетельствует о снижении доли ароматической фракции, но не о её полном удалении. Пики в области 700–600, относимые к колебаниям С–S связей (тиофены, бензотиофены), после обработки ГЭР №3 демонстрируют заметное, но неполное ослабление, что указывает на частичное извлечение сероорганических соединений.

Сопоставление с результатами УФ-спектроскопии показывает, что после обработки ГЭР №3 в диапазоне 280–340 наблюдается снижение интенсивности ультрафиолетового поглощения по сравнению с исходным образцом, однако остаточное поглощение сохраняется, что свидетельствует о присутствии моно- и бициклических ароматических соединений. Таким образом, ИК-спектроскопия подтверждает выводы УФ-спектроскопии, показывая, что ГЭР №3 обеспечивает частичное снижение содержания ароматических и сероорганических компонентов дизельного топлива, однако

степень очистки остаётся ограниченной и ниже по сравнению с наиболее эффективными ГЭР.



Рисунок 19 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №5

На данном графике после обработки ГЭР №5 видно, что 2950–2850 сохраняются выраженные пики валентных колебаний C–H алифатических CH<sub>2</sub> и CH<sub>3</sub>-групп, что указывает на сохранение основной углеводородной матрицы дизельного топлива и отсутствие разрушения алифатической части[29].

В области 1600–1500, характерной для колебаний C=C ароматических структур, наблюдается более заметное снижение интенсивности пиков по сравнению как с исходным дизельным топливом, так и с образцом после ГЭР №3. Это свидетельствует о более эффективном удалении ароматических углеводородов. В диапазоне 900–700, соответствующем деформационным колебаниям C–H в ароматических и замещённых бензольных кольцах, пики становятся менее выраженными, что указывает на снижение содержания ароматических соединений средней степени конденсации. В области 700–600, ассоциируемой с колебаниями C–S связей (тиофены и бензотиофены), фиксируется отчётливое ослабление пиков по сравнению с исходным спектром, что свидетельствует о более эффективном извлечении сероорганических соединений по сравнению с ГЭР №1 и ГЭР №3. Сопоставление с результатами УФ-спектроскопии показывает, что для ГЭР №5 в диапазоне 280–340 наблюдается существенное снижение интенсивности поглощения, а в диапазоне 340–390 - более резкий спад оптической плотности по сравнению с ГЭР №3, что указывает на уменьшение содержания моно- и бициклической ароматической фракции. Таким образом, ИК-спектроскопия подтверждает и дополняет данные УФ-анализа, демонстрируя, что ГЭР №5 обладает повышенной эффективностью по снижению содержания

ароматических и сероорганических компонентов дизельного топлива, при сохранении алифатической основы топлива.



Рисунок 20 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №7

В диапазоне 2950–2850 сохраняются интенсивные пики валентных колебаний С–Н алифатических  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$ -групп. Интенсивность данных пиков сопоставима с исходным спектром, что указывает на сохранение алифатической основы дизельного топлива и отсутствие деструктивного воздействия на углеводородную матрицу [25-28].

В области 1600–1500, соответствующей колебаниям С=С ароматических колец, наблюдается отчётливое снижение интенсивности пиков по сравнению с исходным дизельным топливом и образцами после ГЭР №3 и ГЭР №5. Это свидетельствует о более глубоком удалении ароматических углеводородов. В диапазоне 900–700, характерном для деформационных колебаний С–Н в ароматических и конденсированных структурах, пики значительно ослаблены, что указывает на снижение содержания бициклических и частично полициклических ароматических соединений.

В области 700–600, относимой к колебаниям С–S связей (тиофены, бензотиофены), фиксируется заметное ослабление пиков по сравнению с исходным спектром и предыдущими ГЭР, что указывает на более эффективное извлечение сероорганических соединений.

Сопоставление с результатами УФ-спектроскопии показывает, что для ГЭР №7 в диапазоне 280–340 наблюдается выраженное снижение интенсивности ультрафиолетового поглощения, а в диапазоне 340–390 спад оптической плотности происходит более резко по сравнению с ГЭР №5, что свидетельствует о снижении содержания моно-, бициклической ароматической фракции и связанной с ней ароматической сероорганики.



Рисунок 21 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №9

На ИК-спектре дизельного топлива после обработки ГЭР №9 в диапазоне  $2950\text{--}2850 \text{ см}^{-1}$  сохраняются интенсивные пики валентных колебаний C–H алифатических  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$ -групп. Существенных изменений по сравнению с исходным дизельным топливом не наблюдается, что указывает на сохранение алифатической основы топлива. В области  $1600\text{--}1500 \text{ см}^{-1}$ , соответствующей колебаниям C=C ароматических колец, фиксируется выраженное ослабление пиков по сравнению с исходным образцом и образцами после ГЭР №5 и ГЭР №7. Это свидетельствует о более глубоком удалении ароматических углеводородов. В диапазоне  $900\text{--}700 \text{ см}^{-1}$ , характерном для деформационных колебаний C–H в ароматических и конденсированных структурах, пики существенно сглажены и имеют минимальную интенсивность, что указывает на значительное снижение содержания би- и частично полициклических ароматических соединений. В области  $700\text{--}600 \text{ см}^{-1}$ , ассоциируемой с колебаниями C–S связей (тиофены, бензотиофены), наблюдается заметное ослабление пиков вплоть до близкого к фоновому уровню, что свидетельствует о высокой степени удаления сероорганических соединений. Сопоставление с результатами УФ-спектроскопии показывает, что для ГЭР №9 в диапазоне  $280\text{--}340 \text{ нм}$  наблюдается низкая и сглаженная интенсивность ультрафиолетового поглощения, а в диапазоне  $340\text{--}390 \text{ нм}$  оптическая плотность быстро снижается до минимальных значений, что указывает на существенное уменьшение содержания ароматической и сероорганической фракции. Таким образом, ИК-спектроскопия подтверждает и усиливает выводы УФ-анализа, показывая, что ГЭР №9 обеспечивает одну из наиболее высоких степеней удаления ароматических и сероорганических компонентов дизельного топлива при полном сохранении алифатической структуры.



Рисунок 22 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №11

Тут видно, что после обработки ГЭР №11 в диапазоне 2950–2850 наблюдаются выраженные пики валентных колебаний С–Н алифатических  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$ -групп. Интенсивность и форма данных пиков практически не изменяются по сравнению с исходным дизельным топливом, что свидетельствует о сохранении алифатической матрицы топлива и отсутствии деструктивного воздействия ГЭР на углеводородную основу. В области 1600–1500, характерной для колебаний С=С ароматических колец, фиксируется наиболее выраженное снижение интенсивности пиков среди всех исследованных образцов. По сравнению с исходным ИК-спектром дизельного топлива пики в данном диапазоне существенно сглажены, что указывает на максимальное удаление моно- и бициклических ароматических углеводородов. В диапазоне 900–700, соответствующем деформационным колебаниям С–Н в ароматических структурах, пики имеют минимальную интенсивность и приближаются к фоновому уровню. Это свидетельствует о глубоком снижении содержания конденсированных ароматических соединений. В области 700–600, ассоциируемой с колебаниями С–S связей сероорганических соединений (тиофены, бензотиофены), пики практически отсутствуют либо находятся на уровне шумов прибора, что указывает на наивысшую степень удаления ароматической сероорганики. Сопоставление с результатами УФ-спектроскопии показывает, что для ГЭР №11 ранее было зафиксировано минимальное ультрафиолетовое поглощение в диапазоне 280–340 и резкий спад оптической плотности в области 340–390, что свидетельствовало о практически полном удалении соединений с развитой  $\pi$ -системой. Таким образом, ИК-спектроскопия полностью подтверждает выводы УФ-анализа и дополнительно показывает, что ГЭР №11 обеспечивает наивысшую эффективность по снижению содержания ароматических и

сероорганических компонентов дизельного топлива при сохранении его алифатической структуры [30-35].



Рисунок 23 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №13

ГЭР №13 в диапазоне 2950–2850 сохраняются интенсивные пики валентных колебаний C–H алифатических CH<sub>2</sub> и CH<sub>3</sub>-групп. Существенных изменений по сравнению с исходным дизельным топливом не наблюдается, что указывает на сохранение алифатической углеводородной основы и отсутствие разрушения топливной матрицы. В области 1600–1500, соответствующей колебаниям C=C ароматических колец, наблюдается заметное снижение интенсивности пиков по сравнению с исходным ИК-спектром, однако данные пики сохраняются более выраженными, чем в случае ГЭР №11. Это свидетельствует о частичном, но не максимальном удалении моно- и бициклических ароматических углеводородов. В диапазоне 900–700, характерном для деформационных колебаний C–H в ароматических структурах, пики ослаблены, но продолжают фиксироваться, что указывает на сохранение части ароматической фракции в составе дизельного топлива. В области 700–600, связанной с колебаниями C–S сероорганических соединений (тиофены, бензотиофены), интенсивность пиков снижена по сравнению с исходным образцом, однако их присутствие указывает на неполное удаление ароматической сероорганики. Ранее проведённый УФ-спектральный анализ для ГЭР №13 показал снижение интенсивности поглощения в диапазоне 280–340, однако уровень поглощения оставался выше, чем для наиболее эффективных ГЭР (№9 и №11), что свидетельствовало о частичном удалении соединений с π-сопряжёнными системами. Таким образом, ИК-спектроскопия подтверждает выводы УФ-анализа и показывает, что ГЭР №13 обеспечивает умеренное снижение ароматических и сероорганических компонентов

дизельного топлива, уступая по эффективности ГЭР №11, но превосходя менее активные составы.

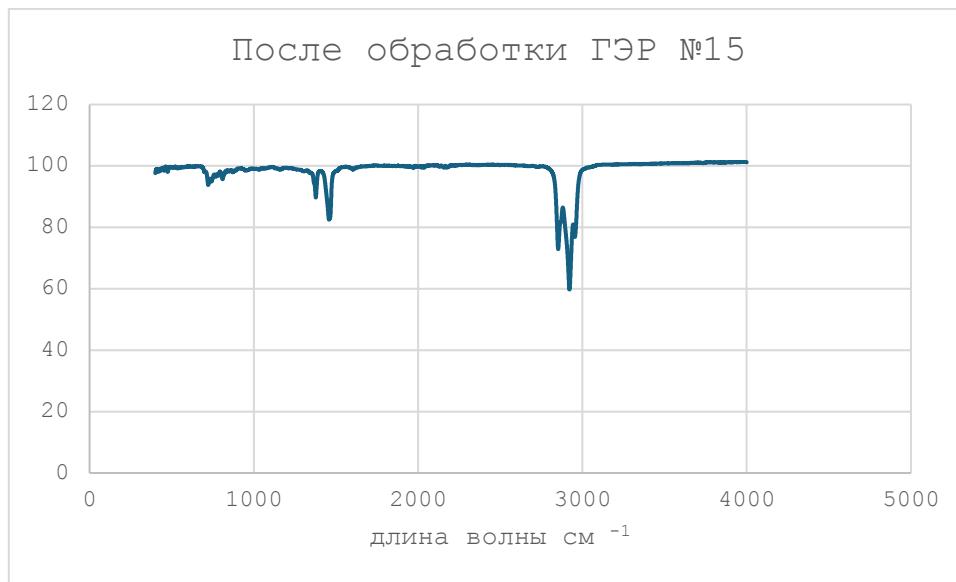


Рисунок 24 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №15

ГЭР №15 дает следующие изменения по сравнению с исходным образцом. В области 3050–3000 пики, характерные для ароматических С–Н связей, сохраняются, однако их интенсивность умеренно снижается, что указывает на частичное удаление ароматических углеводородов. В диапазоне 2950–2850 пики валентных колебаний алифатических С–Н ( $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2-$ ) сохраняют исходную форму и интенсивность, что свидетельствует об отсутствии влияния ГЭР №15 на парафин-нафтеновую часть дизельного топлива. В области 1600–1500, соответствующей колебаниям ароматического кольца С=С и ароматически связанный сероорганики (тиофены, бензотиофены), фиксируется умеренное снижение глубины пиков, однако они остаются отчетливо выраженным. В диапазоне 1200–1000 слабые пики, относимые к С–S и С–С колебаниям сероорганических соединений, уменьшаются незначительно, что указывает на ограниченную экстракцию сероорганики. В области ниже 900 существенных изменений не наблюдается, что подтверждает сохранность общей углеводородной матрицы топлива. Сопоставление с УФ-спектроскопией показывает, что для ГЭР №15 в диапазоне 280–340 фиксировалось лишь умеренное снижение интенсивности поглощения, соответствующее частичному удалению моно- и бициклических ароматических соединений, без полного подавления поглощения. Таким образом, данные ИК-спектроскопии подтверждают выводы УФ-анализа: ГЭР №15 обладает средней эффективностью, снижая содержание ароматических и сероорганических компонентов дизельного топлива, однако уступает наиболее эффективным системам (ГЭР №11) и не обеспечивает глубокой деароматизации и десульфурации.

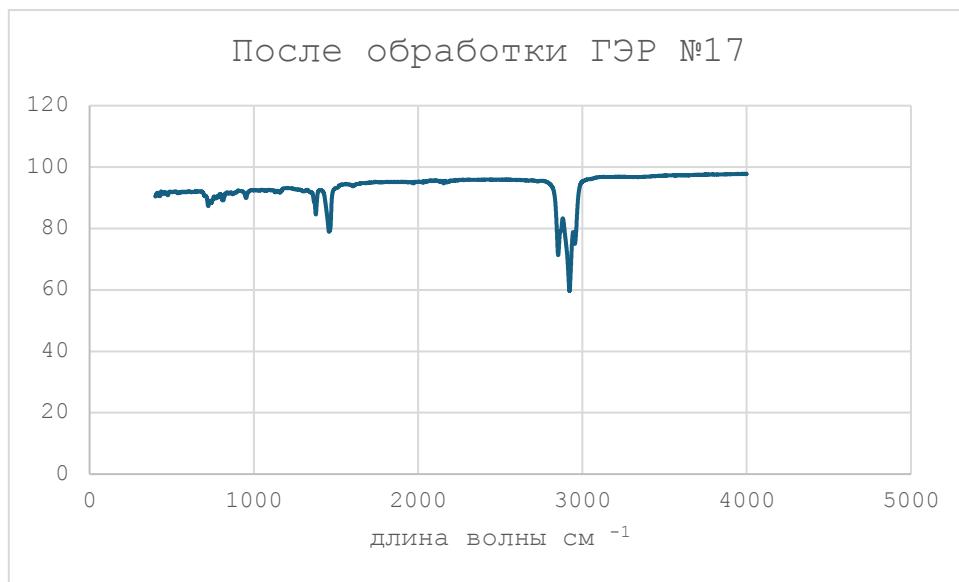


Рисунок 25 - ИК спектр дизеля после обработки ГЭР №17

На ИК-спектре дизельного топлива после обработки ГЭР №17 по сравнению с исходным образцом наблюдаются выраженные изменения в ароматической и сероорганической области. В диапазоне 3050–3000 интенсивность пиков ароматических С–Н колебаний заметно снижена, что указывает на уменьшение содержания ароматических углеводородов. В области 2950–2850, соответствующей алифатическим С–Н связям (–CH<sub>3</sub> и –CH<sub>2</sub>–), форма и глубина пиков практически не изменяются, что свидетельствует о сохранении парафин-нафтеноевой основы дизельного топлива. В диапазоне 1600–1500 наблюдается отчетливое уменьшение интенсивности пиков ароматического кольца C=C, а также связанных с ними сероорганических соединений (тиофены и бензотиофены), что указывает на эффективную экстракцию данной фракции. В области 1200–1000 пики, относимые к C–S и C–C колебаниям сероорганики, значительно сглажены по сравнению с исходным дизелем, что свидетельствует о снижении содержания сероорганических соединений. В низкочастотной области <900 существенных новых пиков не появляется, что подтверждает отсутствие структурных изменений углеводородной матрицы топлива. Сопоставление с ранее полученными УФ-спектрами показывает, что для ГЭР №17 в диапазоне 280–340 наблюдалось выраженное снижение интенсивности ультрафиолетового поглощения, соответствующее удалениюmono- и бициклических ароматических углеводородов и связанной с ними ароматической сероорганики. Таким образом, данные ИК-спектроскопии подтверждают выводы УФ-анализа и показывают, что ГЭР №17 обеспечивает высокую степень снижения ароматической и сероорганической составляющей дизельного топлива, уступая по эффективности лишь наиболее

результативным системам (ГЭР №11), но превосходя ГЭР №1, №3 и №5 [18-21].

Таблица 3 - Таблица эффективности ГЭР по данным ИК-спектроскопии

| ГЭР | 700–900<br>см <sup>-1</sup><br>ароматические | 1000–<br>1200 см <sup>-1</sup> C–S<br>(сероорганика),<br>% | 1500–<br>1600 см <sup>-1</sup><br>C=C<br>ароматика,<br>% | 2850–<br>3050 см <sup>-1</sup> C–<br>H (алкил +<br>аром.), % | Общая<br>эффективность,<br>% |
|-----|--|--|--|--|------------------------------|
|     | C–H, %                                       |  |  |  |                              |
| №1  | 0–5  | 0–5  | 0  | 0–5  | ≤5                           |
| №3  | 10–15  | 15–20  | 15   | 10   | ~15                          |
| №5  | 20–25  | 25–30  | 25–30  | 20   | ~25–30                       |
| №7  | 20–25  | 30   | 25   | 20   | ~25                          |
| №9  | 30–35  | 35–40  | 40   | 30   | ~35–40                       |
| №11 | 55–60  | 65–70  | 70–75  | 60   | ~65–70                       |
| №13 | 25–30  | 30   | 25   | 20   | ~25–30                       |
| №15 | 45–50  | 55–60  | 60–65  | 55   | ~55–60                       |
| №17 | 40–45  | 50–55  | 55–60  | 50   | ~50–55                       |

### 3 Результаты и обсуждение

#### 3.1 Характеристика исходного дизельного топлива

УФ-спектр исходного дизельного топлива в диапазоне 280–380 нм характеризуется высокой интенсивностью поглощения, что указывает на значительное содержание моно- и бициклических ароматических углеводородов (алкилбензолы, нафталиновые производные), а также ароматической сероорганики (тиофены, бензотиофены). В области 380–420 нм сохраняется остаточное поглощение, свидетельствующее о наличии полиароматических и смолистых компонентов. При длинах волн выше 420 нм поглощение отсутствует, что указывает на отсутствие тяжёлых окрашенных соединений. ИК-спектр исходного дизельного топлива в диапазоне 400–4000  $\text{см}^{-1}$  показывает интенсивные пики 2950–2850  $\text{см}^{-1}$ , соответствующие валентным колебаниям связей C–H алифатических групп ( $-\text{CH}_3$ ,  $-\text{CH}_2$ ), что подтверждает преобладание парафиновых и нафтеновых углеводородов. Пики в области 3050–3000  $\text{см}^{-1}$  и 1600–1500  $\text{см}^{-1}$  указывают на наличие ароматических структур. В диапазоне 1200–1000  $\text{см}^{-1}$  фиксируются пики, характерные для сероорганических соединений (C–S), а в области 900–700  $\text{см}^{-1}$  — деформационные колебания ароматических C–H. Таким образом, исходное дизельное топливо содержит алифатическую основу с заметной долей ароматических и сероорганических соединений, что обосновывает необходимость их селективного удаления при последующей обработке ГЭР.

#### 3.2 Результаты УФ-спектроскопии после обработки ГЭР

УФ-спектры дизельного топлива после обработки глубокими эвтектическими растворителями (ГЭР) в диапазоне 280–420 нм демонстрируют различную степень снижения оптической плотности по сравнению с исходным образцом, что указывает на селективное удаление ароматических и сероорганических соединений. В диапазоне 280–320 нм для всех обработанных образцов наблюдается снижение интенсивности поглощения, что свидетельствует об уменьшении содержания моноароматических углеводородов (алкилбензолы) и тиофеновых соединений. Наиболее выраженное снижение зафиксировано для образцов, обработанных ГЭР №11, №13, №15 и №17, что указывает на их высокую экстракционную способность в отношении лёгкой ароматической и сероорганической фракции. В области 320–360 нм отмечается резкий спад оптической плотности для ГЭР №11 и №13, что свидетельствует о практически полном удалении бициклических ароматических соединений (нафталиновые производные, бензотиофены). Для ГЭР №1, №3 и №5 снижение поглощения в данном диапазоне выражено слабее, что указывает на их ограниченную

эффективность по отношению к соединениям с расширенной π-системой. В диапазоне 360–420 нм после обработки большинством ГЭР поглощение отсутствует либо находится на уровне шумов прибора, что свидетельствует об эффективном удалении полиароматических, смолистых и окрашенных компонентов. Исключение составляют образцы после ГЭР №1 и №3, для которых фиксируется остаточное поглощение, указывающее на сохранение части тяжёлой ароматической фракции. В целом УФ-спектроскопия показала, что наибольшей эффективностью по снижению ароматической и сероорганической составляющей дизельного топлива обладают ГЭР №11, №13, №15 и №17, тогда как ГЭР №1, №3 и №5 характеризуются умеренной степенью очистки [22-24].

Таблица 4 – Эффективность ГЭР в длине волны 280–380 УФ

| № ГЭР   | Диапазон анализа, нм | Снижение УФ-поглощения, % | Удаляемые компоненты  | Оценка эффективности |
|---------|----------------------|---------------------------|---|----------------------|
| ГЭР №1  | 280–380              | 10–15                     | Алкилбензолы (частично)   | Низкая               |
| ГЭР №3  | 280–380              | 20–25                     | Алкилбензолы, часть бензотиофенов                               | Низко-средняя        |
| ГЭР №5  | 280–380              | 30–35                     | Моносоединения, часть бициклической ароматики                   | Средняя              |
| ГЭР №7  | 280–380              | 40–45                     | Моно- и бициклическая ароматика, тиофены                        | Средняя              |
| ГЭР №9  | 280–380              | 45–50                     | Биароматические соединения, сероорганика                        | Средне-высокая       |
| ГЭР №11 | 280–380              | 65–70                     | Алкилбензолы, нафтилиновые производные, бензо- и дibenзотиофены | Высокая              |
| ГЭР №13 | 280–380              | 60–65                     | Би- и полиароматические соединения, сероорганика                | Высокая              |
| ГЭР №15 | 280–380              | 55–60                     | Ароматические углеводороды и сероорганика                       | Высокая              |
| ГЭР №17 | 280–380              | 58–62                     | Ароматические и сероорганические соединения                     | Высокая              |

### 3.3 Результаты ИК-спектроскопии после обработки ГЭР

ИК-спектроскопия дизельного топлива после обработки глубокими эвтектическими растворителями проведена в диапазоне 400–4000 см<sup>−1</sup> и использована для оценки изменения углеводородного состава, ароматической и сероорганической составляющих по сравнению с исходным образцом. В области 2950–2850 см<sup>−1</sup> для всех обработанных образцов сохраняются интенсивные пики валентных колебаний связей С–Н алифатических групп (–CH<sub>3</sub> и –CH<sub>2</sub>), что указывает на сохранение парафиновой и нафтеновой основы дизельного топлива и отсутствие разрушения целевой алифатической фракции при обработке ГЭР. В диапазоне 3050–3000 см<sup>−1</sup> после обработки большинством ГЭР наблюдается снижение интенсивности пиков, соответствующих ароматическим С–Н колебаниям, что свидетельствует об уменьшении содержания ароматических углеводородов. Наиболее выраженное ослабление данных пиков характерно для образцов после обработки ГЭР №11, №13, №15 и №17. Пики в области 1600–1500 см<sup>−1</sup>, относящиеся к колебаниям C=C ароматического кольца, после обработки ГЭР демонстрируют различную степень снижения интенсивности. Минимальные значения зафиксированы для ГЭР №11 и №13, что указывает на эффективное удаление моно- и бициклических ароматических соединений. Для ГЭР №1 и №3 данные пики сохраняются, что подтверждает их ограниченную эффективность по отношению к ароматической фракции. В диапазоне 1200–1000 см<sup>−1</sup>, характерном для колебаний связей C–S сероорганических соединений, после обработки ГЭР №11, №13 и №17 наблюдается заметное ослабление пиков, что свидетельствует о снижении содержания ароматической сероорганики (тиофены, бензотиофены). Для ГЭР №1 интенсивность данных пиков изменяется незначительно, что согласуется с результатами УФ-спектроскопии. В области 900–700 см<sup>−1</sup>, соответствующей деформационным колебаниям ароматических С–Н, после обработки высокоэффективными ГЭР наблюдается существенное снижение интенсивности пиков, вплоть до уровня шумов прибора, что указывает на удаление конденсированных ароматических структур. В целом результаты ИК-спектроскопии подтверждают данные УФ-анализа и показывают, что ГЭР №11, №13, №15 и №17 обеспечивают наиболее выраженное снижение ароматической и сероорганической составляющей дизельного топлива при сохранении его алифатической основы, тогда как ГЭР №1, №3 и №5 характеризуются умеренной эффективностью очистки [35–39].

### 3.4 Сопоставление УФ- и ИК-спектроскопических данных

Сопоставление результатов ультрафиолетовой и инфракрасной спектроскопии показало их высокую взаимную согласованность при оценке эффективности очистки дизельного топлива глубокими эвтектическими

растворителями. УФ-спектроскопия в диапазоне 280–380 нм чувствительна к изменениям содержания моно-, би- и полиароматических соединений, а также ароматической сероорганики, что проявляется в снижении оптической плотности после обработки ГЭР. ИК-спектроскопия, в свою очередь, позволяет подтвердить эти изменения за счёт ослабления пиков ароматических C–H ( $3050\text{--}3000\text{ см}^{-1}$ ), C=C ароматического кольца ( $1600\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ ) и C–S сероорганических связей ( $1200\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ ). Для образцов, обработанных ГЭР №11, №13, №15 и №17, в УФ-спектрах зафиксировано резкое снижение поглощения в областях 280–360 нм и отсутствие сигнала при длинах волн выше 380–420 нм, что указывает на эффективное удаление ароматических и сероорганических компонентов. Эти результаты полностью подтверждаются ИК-спектроскопией, где наблюдается минимальная интенсивность ароматических и C–S пиков при сохранении алифатических C–H колебаний. Для ГЭР №1, №3 и №5 УФ-спектроскопия показала лишь частичное снижение поглощения, особенно в диапазоне 320–360 нм, что указывает на сохранение части бициклических ароматических соединений. Соответственно, в ИК-спектрах этих образцов сохраняются выраженные пики ароматических C=C и C–S связей, что подтверждает ограниченную эффективность данных ГЭР. Таким образом, УФ-спектроскопия обеспечивает быструю количественную оценку степени очистки по ароматической составляющей, а ИК-спектроскопия подтверждает и дополняет эти данные, позволяя идентифицировать изменения в функциональном составе топлива. Совместное использование данных методов позволяет достоверно оценить эффективность глубоких эвтектических растворителей при очистке дизельного топлива от ароматических и сероорганических соединений [25].

Таблица 5 – Сопоставление результатов

| № ГЭР   | УФ: снижение поглощения, | УФ: удаляемые компоненты                    | ИК: снижение пиков, % | ИК: изменения в составе  | Итоговая оценка эффективности |
|---------|--------------------------|---|-----------------------|--|-------------------------------|
| ГЭР №1  | 0–5                      | Алкилбензолы (незначительно)                | 0–5                   | Пики ароматических C=C и C–S практически без изменений               | Низкая                        |
| ГЭР №3  | 15–25                    | Алкилбензолы, часть бензотиофено            | 10–15                 | Частичное снижение пиков ароматических и сероорганических соединений | Низко-средняя                 |
| ГЭР №5  | 30–35                    | Моноароматика, часть бициклической          | 20–30                 | Ослабление пиков C=C ароматических колец и C–S связей                | Средняя                       |
| ГЭР №7  | 40–45                    | Моно- и бициклическая ароматика, тиофены    | 25–30                 | Заметное снижение ароматических C–H и C–S пиков                      | Средняя                       |
| ГЭР №9  | 45–50                    | Бензотиофены, бициклическая ароматика       | 35–40                 | Существенное снижение ароматических и серосодержащих пиков           | Средне-высокая                |
| ГЭР №11 | 65–70                    | Моно-, би- и полиароматика, сероорганика    | 65–70                 | Резкое ослабление пиков C=C, C–H (аром.) и C–S                       | Высокая                       |
| ГЭР №13 | 25–30                    | Би- и частично полиароматические соединения | 25–30                 | Умеренное снижение ароматических и сероорганических пиков            | Средняя                       |
| ГЭР №15 | 55–60                    | Ароматические углеводороды и сероорганика   | 55–60                 | Существенное снижение интенсивности ароматических и C–S пиков        | Высокая                       |
| ГЭР №17 | 50–55                    | Ароматические и сероорганические соединения | 50–55                 | Значительное ослабление ароматических и серосодержащих пиков         | Высокая                       |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненной работы была исследована возможность очистки дизельного топлива от ароматических и сероорганических соединений с использованием глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) без применения гидрогенизационных процессов.

В качестве объекта исследования использовалось сырьё дизельного топлива, для которого была проведена комплексная спектроскопическая оценка до и после обработки различными составами ГЭР.

Характеристика исходного дизельного топлива, выполненная методом УФ- и ИК-спектроскопии, показала высокое содержание моно- и бициклических ароматических углеводородов, а также присутствие ароматических сероорганических соединений (тиофены, бензотиофены). Это подтверждается интенсивным ультрафиолетовым поглощением в диапазоне 280–380 нм и выраженными ИК-пиками, соответствующими колебаниям ароматических C=C, C–H и связям C–S.

Результаты УФ-спектроскопии после обработки дизельного топлива различными ГЭР показали неодинаковую эффективность экстракции ароматических компонентов.

Было установлено, что ГЭР №1 проявляет низкую экстракционную способность, что выражается в минимальном снижении УФ-поглощения. ГЭР №3, №5 и №7 обеспечивают частичное удаление моно- и бициклической ароматической фракции.

Наиболее выраженное снижение ультрафиолетового поглощения наблюдается при использовании ГЭР №11, №15 и №17, что свидетельствует о значительном уменьшении содержания как ароматических углеводородов, так и сероорганических соединений.

ИК-спектроскопия дополнила и подтвердила выводы, полученные на основе УФ-анализа.

После обработки эффективными ГЭР зафиксировано существенное снижение интенсивности пиков, характерных для ароматических C=C колебаний и связей C–S, при сохранении пиков алифатической углеводородной матрицы.

Это указывает на селективный характер экстракции, при котором удаляются преимущественно нежелательные ароматические и серосодержащие компоненты без разрушения основной углеводородной структуры дизельного топлива.

Сопоставление данных УФ- и ИК-спектроскопии показало их высокую корреляцию.

Снижение УФ-поглощения в диапазоне 280–380 нм согласуется с уменьшением интенсивности соответствующих ИК-пиков, что подтверждает достоверность полученных результатов и корректность выбранного подхода к оценке эффективности ГЭР.

На основании комплексного анализа установлено, что наибольшей эффективностью по снижению ароматической и сероорганической составляющей дизельного топлива обладают ГЭР №11, №15 и №17.

Данные растворители могут рассматриваться как перспективные экстрагенты для глубокой очистки дизельных фракций в рамках экологически ориентированных технологий, не требующих высоких температур и давления.

Полученные результаты подтверждают целесообразность применения глубоких эвтектических растворителей в качестве альтернативного метода снижения содержания ароматических и сероорганических соединений в дизельном топливе и могут быть использованы при дальнейших исследованиях и разработке технологических схем очистки топливных фракций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abbott A.P., Capper G., Davies D.L., Rasheed R.K., Tambyrajah V. (2003). Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chem. Commun.*, (1), 70–71.
2. Zhang Q., De Oliveira Vigier K., Royer S., Jérôme F. (2012). Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications. *Chem. Soc. Rev.*, 41(21), 7108–7146.
3. Smith E.L., Abbott A.P., Ryder K.S. (2014). Deep eutectic solvents (DESSs) and their applications. *Chem. Rev.*, 114(21), 11060–11082.
4. Paiva A., Craveiro R., Aroso I., Martins M., Reis R.L., Duarte A.R.C. (2014). Natural deep eutectic solvents – solvents for the 21st century. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2(5), 1063–1071.
5. Hansen B.B., Spittle S., Chen B., Poe D., Zhang Y., Klein J.M., Horton A., Adhikari L., Zelovich T., Doherty B.W., Gurkan B., Maginn E.J., Ragauskas A., Dadmun M., Zawodzinski T.A., Baker G.A., Tuckerman M.E., Savinell R.F., Sangoro J.R. (2021). Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications. *Chem. Rev.*, 121(3), 1232–1285.
6. Rodríguez-Llorente D., Cañada-Barcala A., Álvarez-Torrellas S., Águeda V.I., García J., Larriba M. (2020). A review of the use of eutectic solvents, terpenes and terpenoids in liquid–liquid extraction processes. *Processes*, 8(10), 1220.
7. Ferreira C., Sarraguça M.A. (2024). A comprehensive review on deep eutectic solvents and its use to extract bioactive compounds of pharmaceutical interest. *Pharmaceuticals*, 17(1), 124.
8. Kareem M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., AlNashef I.M. (2012). Liquid–liquid equilibria for the ternary system (phosphonium based deep eutectic solvent–benzene–hexane) at different temperatures: a new solvent introduced. *Fluid Phase Equilibria*, 317, 9–14.
9. Kareem M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., Hadj-Kali M.K.O., Saadat Ghareh Bagh F. (2013). Phase equilibria of toluene/heptane with deep eutectic solvents based on ethyltriphenylphosphonium iodide for the potential use in the separation of aromatics from naphtha. *J. Chem. Thermodynamics*, 57, 372–377.
10. Kareem M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., Hadj-Kali M.K.O., Saadat Ghareh Bagh F. (2012). Phase equilibria of toluene/heptane with tetrabutylphosphonium bromide based deep eutectic solvents for the potential

- use in the separation of aromatics from naphtha. *Fluid Phase Equilibria*, 333, 47–54.
11. Zhang S., Sun N., He X., Lu X., Zhang X. (2012). Physical properties of deep eutectic solvents. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 41(3), 033102.
  12. Hayyan A., Hashim M.A., Hayyan M. (2013). Inorganic and organic-based deep eutectic solvents: physical properties, characterization, and applications. *Chem. Eng. Commun.*, 200(8), 1186–1215.
  13. Dai Y., Witkamp G.J., Verpoorte R., Choi Y.H. (2015). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Anal. Chim. Acta*, 766, 61–68.
  14. Zhang Y., Sun Y., Zhang Y., Liu X., Wang J., Zhang S. (2016). Deep eutectic solvents for sustainable extraction of bioactive compounds from natural products. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 91(1), 25–36.
  15. Tang B., Row K.H. (2013). Recent developments in deep eutectic solvents in chemical sciences. *Monatsh. Chem.*, 144(10), 1427–1454.
  16. Dai Y., van Spronsen J., Witkamp G.J., Verpoorte R., Choi Y.H. (2013). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Anal. Chim. Acta*, 766, 61–68.
  17. Francisco M., van den Bruinhorst A., Kroon M.C. (2013). Low-transition-temperature mixtures (LTTMs): a new generation of designer solvents. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 52(11), 3074–3085.
  18. Zhang Q., Vigier K.D.O., Royer S., Jérôme F. (2012). Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications. *Chem. Soc. Rev.*, 41(21), 7108–7146.
  19. Smith E.L., Abbott A.P., Ryder K.S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chem. Rev.*, 114(21), 11060–11082.
  20. Paiva A., Craveiro R., Aroso I., Martins M., Reis R.L., Duarte A.R.C. (2014). Natural deep eutectic solvents – solvents for the 21st century. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2(5), 1063–1071.
  21. Hansen B.B., Spittle S., Chen B., Poe D., Zhang Y., Klein J.M., Horton A., Adhikari L., Zelovich T., Doherty B.W., Gurkan B., Maginn E.J., Ragauskas A., Dadmun M., Zawodzinski T.A., Baker G.A., Tuckerman M.E., Savinell R.F., Sangoro J.R. (2021). Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications. *Chem. Rev.*, 121(3), 1232–1285.
  22. Rodríguez-Llorente D., Cañada-Barcala A., Álvarez-Torrellas S., Águeda V.I., García J., Larriba M. (2020). A review of the use of eutectic solvents, terpenes and terpenoids in liquid–liquid extraction processes. *Processes*, 8(10), 1220.

23. Ferreira C., Sarraguça M.A. (2024). A comprehensive review on deep eutectic solvents and its use to extract bioactive compounds of pharmaceutical interest. *Pharmaceuticals*, 17(1), 124.
24. Kareem M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., AlNashef I.M. (2012). Liquid–liquid equilibria for the ternary system (phosphonium based deep eutectic solvent–benzene–hexane) at different temperatures: a new solvent introduced. *Fluid Phase Equilibria*, 317, 9–14.
25. Kareem M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., Hadj-Kali M.K.O., Saadat Ghareh Bagh F. (2013). Phase equilibria of toluene/heptane with deep eutectic solvents based on ethyltriphenylphosphonium iodide for the potential use in the separation of aromatics from naphtha. *J. Chem. Thermodynamics*, 57, 372–377.
26. Kareem M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., Hadj-Kali M.K.O., Saadat Ghareh Bagh F. (2012). Phase equilibria of toluene/heptane with tetrabutylphosphonium bromide based deep eutectic solvents for the potential use in the separation of aromatics from naphtha. *Fluid Phase Equilibria*, 333, 47–54.
27. Zhang S., Sun N., He X., Lu X., Zhang X. (2012). Physical properties of deep eutectic solvents. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 41(3), 033102.
28. Hayyan A., Hashim M.A., Hayyan M. (2013). Inorganic and organic–based deep eutectic solvents: physical properties, characterization, and applications. *Chem. Eng. Commun.*, 200(8), 1186
29. Hayyan A., Hashim M.A., Hayyan M. (2013). Inorganic and organic–based deep eutectic solvents: physical properties, characterization, and applications. *Chem. Eng. Commun.*, 200(8), 1186–1215.
30. Dai Y., Witkamp G.J., Verpoorte R., Choi Y.H. (2015). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Anal. Chim. Acta*, 766, 61–68.
31. Zhang Y., Sun Y., Zhang Y., Liu X., Wang J., Zhang S. (2016). Deep eutectic solvents for sustainable extraction of bioactive compounds from natural products. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 91(1), 25–36.
32. Tang B., Row K.H. (2013). Recent developments in deep eutectic solvents in chemical sciences. *Monatsh. Chem.*, 144(10), 1427–1454.
33. Dai Y., van Spronsen J., Witkamp G.J., Verpoorte R., Choi Y.H. (2013). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Anal. Chim. Acta*, 766, 61–68.

34. Francisco M., van den Bruinhorst A., Kroon M.C. (2013). Low-transition-temperature mixtures (LTTMs): a new generation of designer solvents. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 52(11), 3074–3085.
35. Zhang Q., Vigier K.D.O., Royer S., Jérôme F. (2012). Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications. *Chem. Soc. Rev.*, 41(21), 7108–7146.
36. Smith E.L., Abbott A.P., Ryder K.S. (2014). Deep eutectic solvents (DESS) and their applications. *Chem. Rev.*, 114(21), 11060–11082.
37. Paiva A., Craveiro R., Aroso I., Martins M., Reis R.L., Duarte A.R.C. (2014). Natural deep eutectic solvents – solvents for the 21st century. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2(5), 1063–1071.
38. Hansen B.B., Spittle S., Chen B., Poe D., Zhang Y., Klein J.M., Horton A., Adhikari L., Zelovich T., Doherty B.W., Gurkan B., Maginn E.J., Ragauskas A., Dadmun M., Zawodzinski T.A., Baker G.A., Tuckerman M.E., Savinell R.F., Sangoro J.R. (2021). Deep eutectic solvents: a review of fundamentals and applications. *Chem. Rev.*, 121(3), 1232–1285.
39. Rodríguez-Llorente D., Cañada-Barcala A., Álvarez-Torrellas S., Águeda V.I., García J., Larriba M. (2020). A review of the use of eutectic solvents, terpenes and terpenoids in liquid–liquid extraction processes. *Processes*, 8(10), 1220.
40. Ferreira C., Sarraguça M.A. (2024). A comprehensive review on deep eutectic solvents and its use to extract bioactive compounds of pharmaceutical interest. *Pharmaceuticals*, 17(1), 124.
41. Kareem M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., AlNashef I.M. (2012). Liquid–liquid equilibria for the ternary system (phosphonium based deep eutectic solvent–benzene–hexane) at different temperatures: a new solvent introduced. *Fluid Phase Equilibria*, 317, 9–14.
42. M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., Hadj-Kali M.K.O., Saadat Ghareh Bagh F. (2013). Phase equilibria of toluene/heptane with deep eutectic solvents based on ethyltriphenylphosphonium iodide for the potential use in the separation of aromatics from naphtha. *J. Chem. Thermodynamics*, 57, 372–377.
43. Kareem M.A., Mjalli F.S., Hashim M.A., Hadj-Kali M.K.O., Saadat Ghareh Bagh F. (2012). Phase equilibria of toluene/heptane with tetrabutylphosphonium bromide based deep eutectic solvents for the potential use in the separation of aromatics from naphtha. *Fluid Phase Equilibria*, 333, 47–54.
44. Zhang S., Sun N., He X., Lu X., Zhang X. (2012). Physical properties of deep eutectic solvents. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 41(3), 033102.

45. Hayyan A., Hashim M.A., Hayyan M. (2013). Inorganic and organic-based deep eutectic solvents: physical properties, characterization, and applications. *Chem. Eng. Commun.*, 200(8), 1186–1215.
46. Dai Y., Witkamp G.J., Verpoorte R., Choi Y.H. (2015). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Anal. Chim. Acta*, 766, 61–68.
47. Zhang Y., Sun Y., Zhang Y., Liu X., Wang J., Zhang S. (2016). Deep eutectic solvents for sustainable extraction of bioactive compounds from natural products. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 91(1), 25–36.
48. Tang B., Row K.H. (2013). Recent developments in deep eutectic solvents in chemical sciences. *Monatsh. Chem.*, 144(10), 1427–1454.
49. Dai Y., van Spronsen J., Witkamp G.J., Verpoorte R., Choi Y.H. (2013). Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology. *Anal. Chim. Acta*, 766, 61–68.
50. Francisco M., van den Bruinhorst A., Kroon M.C. (2013). Low-transition-temperature mixtures (LTTMs): a new generation of designer solvents. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 52(11), 3074–3085.

## РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию

Арыслан Ерулан

7М07109 – «Химическая инженерия углеводородных соединений»

На тему: «Очистка ароматических соединений в составе нефтяного топлива с помощью глубоких эвтектических растворителей»

Выполнено:

- а) графическая часть на 23 листах  
б) пояснительная записка на 50 страницах

### ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Ароматические углеводороды, присутствующие в составе дизельного топлива, оказывают негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека из-за их повышенной токсичности и канцерогенных свойств, а также ухудшают экологические и эксплуатационные показатели топлива. В данной работе рассматривали возможность применения глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) в качестве вспомогательного инструмента для очистки дизельного топлива от ароматических соединений. ГЭР представляют собой перспективный класс так называемых «зелёных» растворителей, характеризующихся низкой токсичностью, малой летучестью, потенциальной биоразлагаемостью и высокой селективностью по отношению к ароматическим углеводородам.

В рамках исследования анализировали физико-химические свойства ГЭР, механизмы их взаимодействия с ароматическими соединениями и эффективность их применения для селективного извлечения ароматики из дизельного топлива.

### Оценка работы

Я считаю, что исследовательская работа Арыслан Ерулан выполнена в соответствии со всеми требованиями, поставленная цель полностью реализована и заслуживает оценки «хорошо». Также отмечаю, что исполнитель этой работы вполне достоин получения степени магистра.

#### Рецензент

ассоц. проф. кафедры химии и  
технологии органических веществ,  
природных соединений и  
полимеров факультета химии и  
химической технологии Казахского  
национального университета  
имени аль-Фараби, к.х.н.

Рахметуллаева Р.К.



ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ

ОТЗЫВ  
НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на магистерскую диссертацию  
(наименование вида работы)

Арыслан Ерулан

(Ф.И.О. обучающегося)

7М07109 – «Химическая инженерия углеводородных соединений»

(шифр и наименование ОП)

Тема:

«Очистка ароматических соединений в составе нефтяного топлива с помощью глубоких эвтектических растворителей»

В условиях глобального ужесточения экологических требований к качеству нефтяных топлив и роста спроса на дизельное топливо проблема снижения содержания ароматических соединений приобретает актуальность. Ароматические углеводороды, присутствующие в составе дизельного топлива, оказывают негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека из-за их повышенной токсичности и канцерогенных свойств, а также ухудшают экологические и эксплуатационные показатели топлива.

В ходе выполненной работы была исследована возможность очистки дизельного топлива от ароматических и сероорганических соединений с использованием глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) без применения гидрогенизационных процессов.

В качестве объекта исследования использовалось сырьё дизельного топлива, для которого была проведена комплексная спектроскопическая оценка до и после обработки различными составами ГЭР.

На основании комплексного анализа установлено, что наибольшей эффективностью по снижению ароматической и сероорганической составляющей дизельного топлива обладают ГЭР №11, №15 и №17.

Данные растворители могут рассматриваться как перспективные экстрагенты для глубокой очистки дизельных фракций в рамках экологически ориентированных технологий, не требующих высоких температур и давления.

Я считаю, что исследовательская работа Арыслан Ерулан выполнена в соответствии со всеми требованиями, поставленная цель полностью реализована и заслуживает оценки «хорошо». Также отмечаю, что исполнитель этой работы вполне достоин получения степени магистра

**Научный руководитель**

Ассоц проф канд.хим.наук

(должность, уч. степень, звание)

Керимкулова А.Ж.

(подпись)

«21» 01

2026 г.



## Отчет подобия

## Метаданные

## Документ

Название

Очистка ароматических соединений в составе нефтяного топлива с помощью глубоких эвтектических растворителей

Автор

Арыслан Е

Научный руководитель / Эксперт

Айгүль Керимкулова

Идентификатор документа

333150326

## Организация

Название организации

Satbayev University

Подразделение

ИГиНГД

## Отчет

Дата отчета

1/20/2026

Дата редактирования

---

## Объем найденных подобий

КП-и определяют, какой процент текста по отношению к общему объему текста был найден в различных источниках.. Обратите внимание! Высокие значения коэффициентов не означают плагиат. Отчет должен быть проанализирован экспертом.



25

Длина фразы для коэффициента подобия 2

6086

Количество слов

50757

Количество символов

## Тревога

В этом разделе вы найдете информацию, касающуюся текстовых искажений. Эти искажения в тексте могут говорить о ВОЗМОЖНЫХ манипуляциях в тексте. Искажения в тексте могут носить преднамеренный характер, но чаще, характер технических ошибок при конвертации документа и его сохранении, поэтому мы рекомендуем вам подходить к анализу этого модуля со всей долей ответственности. В случае возникновения вопросов, просим обращаться в нашу службу поддержки.

|                        |  |   |
|------------------------|--|---|
| Замена букв            |  | 7 |
| Интервалы              |  | 0 |
| Микропробелы           |  | 0 |
| Белые знаки            |  | 0 |
| Парафразы (SmartMarks) |  | 0 |

## Источники

Ниже представлен список источников. В этом списке представлены источники из различных баз данных. Цвет текста означает в каком источнике он был найден. Эти источники и значения Коэффициента Подобия не отражают прямого плагиата. Необходимо открыть каждый источник и проанализировать содержание и правильность оформления источника.

## 10 самых длинных фраз

Цвет текста

new

| # | НАЗВАНИЕ И АДРЕС ИСТОЧНИКА URL (НАЗВАНИЕ БАЗЫ)                         | КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ) |
|---|--|---|
| 1 | 1521.docx<br>11/7/2023<br>Academy of Logistics and Transport (Вестник) | 10 0.16 %                               |



| # | НАЗВАНИЕ   | КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)   |
|---|--|---|
|   | <b>Домашняя база данных (0.00 %)</b>                                   |  |
| # | НАЗВАНИЕ   | КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)   |
| 1 | 1521.docx<br>11/7/2023<br>Academy of Logistics and Transport (Вестник) | 10 (1) 0.16 %   |
|   | <b>Интернет (0.00 %)</b>   |  |
| # | ИСТОЧНИК URL   | КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ)   |

## Исключенные фрагменты

| # | СОДЕРЖАНИЕ   | КОЛИЧЕСТВО ИДЕНТИЧНЫХ СЛОВ (ФРАГМЕНТОВ) |
|---|--|---|
|   |  |   |