

УДК 665.765

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-69-73

АДСОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ ОТ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

*канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ, канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА,
д-р техн. наук, проф. С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)
PhD, доц. АЛИШЕР ХОШИМ ОГЛИ ТЕМИРОВ,
ДИЁР ХИКМАТУЛЛО ОГЛИ ИЗЗАТОВ
(Бухарский государственный технический университет, Республика Узбекистан)*

Приведено описание адсорбционных методов очистки дизельного топлива от ароматических углеводородов. Установлено, что путем адсорбционной деароматизации дизельного топлива с использованием оптимального сорбента силикагеля КСК-2, селективно активированного на ароматические углеводороды, можно получить дизельное топливо, соответствующее нормам европейской спецификации. Показан промышленный процесс выделения ароматики из различных нефтяных фракций в стационарном слое силикагеля.

Ключевые слова: адсорбция, адсорбционные методы очистки, дизельное топливо, ароматические углеводороды, силикагель, циклогексан, парафины, депарафинизация, экологический стандарт.

Введение. Дизельное топливо играет ключевую роль в мировой транспортной индустрии благодаря своим уникальным химическим и физическим характеристикам, которые делают его незаменимым для множества видов двигателей. Эти свойства влияют на производительность, эффективность и экологическую чистоту транспортных средств.

Химический состав дизельного топлива включает различные углеводороды, в основном алканы, циклоалканы и ароматические углеводороды, с молекулярной массой от C₁₀H₂₀ до C₁₅H₂₈. Эти компоненты способствуют высокой плотности энергии, что обеспечивает высокую эффективность использования дизельного топлива.

Стандарты Евро-3, введенные в начале 2000-х годов, ознаменовали важный шаг в развитии дизельных технологий, ставя акцент на снижение экологического воздействия дизельных двигателей и повышение качества дизельного топлива.

Внедрение стандарта Евро-5 в сентябре 2009 г. значительно повлияло на экологические характеристики дизельных транспортных средств, целеустремленно сокращая выбросы загрязняющих веществ и улучшая качество атмосферного воздуха [1].

Таблица 1 демонстрирует ключевые различия между различными стандартами дизельного топлива и абсорбентом газоконденсатным. Она помогает понять эволюцию экологических стандартов и улучшения, достигнутые в дизельном топливе на протяжении этих изменений.

Таблица 1. – Сравнение Дизельного топлива стандартов Евро-3, Евро-5 и абсорбента газоконденсатного

| Характеристика | Евро-3 | Евро-4 | Евро-5 | Абсорбент газоконденсатный |
|-------------------------------------|--------------|------------|-------------|----------------------------|
| Цетановое число | 46-49 | 48-51 | 51-55 | 44-47 |
| Содержание серы (мг/кг) | До 350 | До 50 | До 10 | До 50 |
| Выбросы NO _x (мг/км) | До 500 | До 250 | До 180 | До 250 |
| Выбросы твердых частиц (мг/км) | До 50 | До 25 | До 5 | До 25 |
| Влияние на экологию | Умеренное | Улучшенное | Оптимальное | Улучшенное |
| Соответствие современным стандартам | Ограниченное | Частичное | Полное | Частичное |

Стандарты Евро-3, Евро-4 и Евро-5 постепенно повышали экологические требования, улучшая качество воздуха и сокращая вредные выбросы. Абсорбент газоконденсатный, используемый как добавка, способствует дальнейшему улучшению свойств дизельного топлива, особенно в отношении цетанового числа и эмиссии загрязняющих веществ.

Бухарский нефтеперерабатывающий завод впервые в Узбекистане начал выпуск «экологически чистого и высококачественного» дизельного топлива класса Евро-6. Дизтопливо Евро-6 содержит не более 5 мг/кг (ppm) массовой доли серы и не более 4% массовой доли полициклических ароматических углеводородов [2].

Евро-6 – экологический стандарт, регулирующий содержание вредных веществ в выхлопных газах. В таблице 2 приведены предыдущие экологические стандарты для легковых автомобилей в сравнении с Евро-6 (в г/км).

Таблица 2. – Сравнение экологических стандартов на дизельное топливо

| Экологический стандарт | Оксид углерода (II) (CO) | Оксид азота (NOx) | Углерод+NOx | Взвешенные частицы (PM) |
|------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| Евро-1 | 2,72 (3,16) | – | 0,97 (1,13) | 0,14 (0,18) |
| Евро-2 | 1,00 | – | 0,7 | 0,08 |
| Евро-3 | 0,64 | 0,50 | 0,56 | 0,05 |
| Евро-4 | 0,50 | 0,25 | 0,30 | 0,025 |
| Евро-5 | 0,50 | 0,18 | 0,23 | 0,005 |
| Евро-6 | 0,50 | 0,08 | 0,17 | 0,005 |

Адсорбционное выделение *n*-алканов из нефтяных фракций основано на молекулярно-ситовом эффекте цеолитов 5А, который они проявляют по отношению к *n*-алканам, имеющим диаметр молекулы 4,9 А, который меньше, чем диаметр молекул других групп углеводородов, входящих в состав нефтяной фракции.

Основная часть. Адсорбция ароматических углеводородов. Наряду с депарафинизацией дизельного топлива не менее актуальную роль играет деароматизация – снижение концентрации ароматических углеводородов. Ароматика повышает нагарообразование в двигателе, налипание асфальто-смолистых веществ, снижает цетановое число (воспламенительные свойства), что может вызвать затруднение при пуске двигателя в зимний период.

В качестве адсорбента для выделения ароматических углеводородов из дизельного топлива был выбран силикагель. Он является важным материалом для решения задачи использования различных хроматографических методов очистки углеводородов, что позволяет определить индивидуальный состав, провести спектроскопический анализ, а также применить химические и физические методы для удовлетворения исследовательских нужд, особенно при поиске различных компонентов.

Интерес к силикагелю связан с его качественными характеристиками: высокой адсорбционной способностью, селективностью адсорбции, возможностью активного взаимодействия без потери регенерационных свойств, многократным проявлением адсорбционных свойств, высокой стойкостью частиц, термохимической стабильностью, разнообразием гранулированных и порошкообразных форм, а также возможно дешевой получением и др.

Адсорбенты типа силикагеля относятся к анионному типу. В данном случае химическая природа адсорбции носит специфичный характер и оказывает значительное влияние: при взаимодействии отдельных молекул формируются дисперсионные силы, а при взаимодействии адсорбентов общий эффект усиливается.

Силикагель был выбран для разделения смеси углеводородов с ароматическими углеводородами; адсорбция осуществляется с другими классами соединений. На рисунке 1 изображен обычный парафин, бензол и толуол, а также С6–С6 циклопарафины при 150 °С. Бинарные соединения¹ заданы кривой баланса адсорбции. Кривая иллюстрирует адсорбцию бензола *n*-гексаном и циклогексаном (ближайший по строению углеводород имеет схожую молекулярную массу; адсорбция *n*-гексана значительно превосходит адсорбцию *n*-октана и *n*-гексана). Ароматический углеводород в жидкой фазе, вводимый в процессе отбора, также сохраняется в продуктах отбора. Силикагель во многих соединениях широко применяется для анализа адсорбции углеводородов в различных компонентах [3; 4].

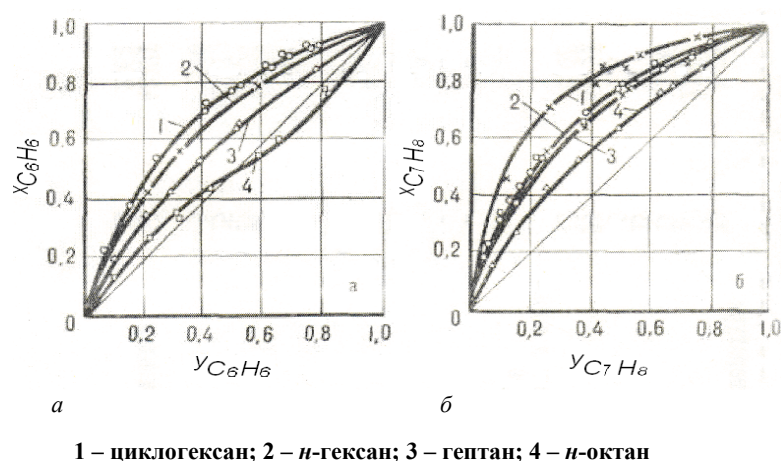


Рисунок 1. – Кривые адсорбционного равновесия смесей бензола (а) и толуола (б) с парафиновыми углеводородами на мелкопористом силикагеле при 150 °С и нормальном давлении

¹ Веремчук М.К. Разделение и каталитические превращения углеводородов на синтетических цеолитах: автореф. дис. ... д-ра хим. наук: / АН СССР, Львов. политех. ин-т. – Львов, 1972.

В работе², а также в монографии [5] приведены данные о применении силикагеля с активированным углем и цеолитов для очистки циклогексана при 6,50 °С до соответствующего температурного режима кристаллизационной адсорбции: адсорбент с активированным углем является наиболее эффективным.

Адсорбенты, предназначенные для отделения ароматических углеводородов от масляных фракций, отличаются высокой механической прочностью и обладают характеристиками, позволяющими использовать их в течение длительного времени. Легко регенерируемая эмульсия, являющаяся инертным химическим веществом и экономически более выгодной по сравнению с отдельными компонентами, должна быть недорогой. Толуол-изооктановая смесь, используемая для разделения адсорбентов, в различных исследованиях активированного угля и оксида алюминия показала, что наиболее крупнопористый силикагель способен проявлять селективность. Силикагель применяется в промышленности для разделения ароматических углеводородов [8].

Разделение ароматических углеводородов и масляной фракции, полученной из газовых конденсатов, представляет собой отдельное направление многолетних исследований, проводимых в области специальных методов обработки данного адсорбента с целью получения крупнопористого силикагеля КС-2.

Данные, полученные по активированному углю для дальнейшей выработки, превышают соответствующие показатели для дизельного топлива, поскольку он обеспечивает деароматизацию на силикагеле согласно евростандарту, его исходная сорбционная способность: 1,45–2,00% по массе соответственно.

По данным А.В. Киселева [7], ионы ароматических углеводородов осаждаются на поверхности адсорбента в виде комплексных соединений под воздействием площади поверхности адсорбента и электростатического электронейтрального дипольного момента, возникающего в результате образования молекулы ароматического углеводорода.

Данные, полученные с использованием активированного материала для работы по евростандарту, оказались более целесообразными.

Дизельное топливо европейских стандартов EN 590, Евро-2 и Евро-3 для Австралии и Японии используется в стандартных количествах в соответствии с установленными нормами. В Швеции и США определяется общее содержание ароматических углеводородов. Таким образом, Швеция специализируется на дизельном топливе, которое подразделяется на топливо 1-го и 2-го классов. Ароматическое топливо 1-го класса составляет 5% от объема ароматического топлива 2-го класса, при этом достигается 20%. Европейский стандарт на дизельное топливо EN 590 (Евро-2, Евро-3), Евро-4, Евро-5 определяет общее количество ароматических углеводородов, однако политика по ароматическим углеводородам (PAU) устанавливает их уровень [8].

В данной статье представлен опыт работы с дизельным топливом Бухарского НПЗ по улучшению качества адсорбции методом деароматизации [9; 10]. Как известно [11], существуют отдельные методы получения различных ароматических углеводородов: азеотропное вытеснение, экстрактивное вытеснение и адсорбция. В качестве более простого, дешевого и универсального метода для выделения дизельного топлива была выбрана адсорбция.

Заключение. Адсорбция ароматических углеводородов в дизельном топливе посредством деароматизации позволяет снизить содержание полициклических соединений, обеспечить низкую токсичность продуктов сгорания, улучшить его экологические свойства, а также уменьшить количество сажи. Таким образом количество оксидов серы и азота снижается на 15%, увеличивается цетановое число дизельного топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ароматические углеводороды дизельных топлив / Т.Н. Митусова, Е.Е. Сафонова, Л.В. Бармина и др. // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2005. – № 4. – С. 15–16.
2. Зегер К.Е., Котлер В.Р. Получение дизельного топлива с улучшенными экологическими характеристиками // ХТТМ. – 1996. – № 6. – С. 25–27.
3. Mair V. J., Rossini F. D. Composition of Lubricating Oil Portion of Petroleum // Ind. Eng. Chem. – 1955. – № 47(5). – P. 1062–1068. DOI: 10.1021/IE50545A050
4. Россини Ф. Д., Мэйр Б. Дж., Стрейф А. Дж. Углеводороды нефти: Разделение, анализ, выделение, очистка и свойства нефт. углеводородов / пер. с англ. Ю.А. Бедова и др.; под ред. проф. С.Р. Сергиенко. – Л.: Гостоптехиздат. Ленингр. отд-ние, 1957. – 470 с.
5. Рябова Н.Д. Адсорбенты для светлых нефтепродуктов. – Ташкент: ФАН, 1975. – 144 с.
6. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1976. – 448 с.
7. Иониты и ионный обмен: сб. ст. / Акад. наук СССР; отв. ред. акад. А.В. Киселев. – М.: Наука, 1966. – 188 с.: ил.
8. Емельянов В.Е., Туровский Ф.В. Снижение вредных выбросов автотранспорта // Экология и промышленность России. – 2001. – № 1. – С. 4–5.
9. Адсорбционная деароматизация дизельного топлива / Н.Ш. Мухтаров, Б.Н. Хамидов, М.М. Мирзаева и др. // Узбекский журнал нефти и газа. – 2009. – № 2. – С. 41–43.

² Адылова Т.Т. Адсорбционно-криоскопический метод определения группового состава нефтепродуктов: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.11. – Ташкент, 1964. – 24 с.

10. Шарипов К.К. Дизельное топливо улучшенного качества. Ёш олимларнинг «Юкори технологик ишланмалар ишлаб чиқариш» мавзуидаги илмий-амалий анжумани. – Тошкент, 2010. – С. 82–84.
11. Сулимов А.Д. Выделение ароматических углеводородов из нефтяного сырья. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 61 с. – (Новая техника нефтяной промышленности).

Поступила 03.04.2026

ADSORPTION METHODS FOR PURIFYING DIESEL FUELS FROM AROMATIC HYDROCARBONS

A. SPIRIDONOV, E. SAFRONOVA, S. EKHILEVSKII
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)
ALISHER KHOSHIM OGLI TEMIROV, DIYOR HIKMATULLO OGLI IZZATOV
(*Bukhara State Technical University, Republic of Uzbekistan*)

This article describes adsorption methods for removing aromatic hydrocarbons from diesel fuel. It is shown that adsorption dearomatization of diesel fuel using the optimal silica gel sorbent KSK-2, selectively activated for aromatic hydrocarbons, can produce diesel fuel that meets European specifications. An industrial process for separating aromatics from various petroleum fractions in a fixed-bed silica gel is demonstrated.

Keywords: *adsorption, adsorption purification methods, diesel fuel, aromatic hydrocarbons, silica gel, cyclohexane, paraffins, dewaxing, environmental standard.*