



ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭКСТРАГЕНТОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Ву Нгок Зан, В.Ф. Новиков

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
vndan@cnd.edu.vn

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Для контроля технического состояния маслonaполненного электрооборудования в последнее время создан ряд новых аналитических методик, позволяющих определять ультрамалые концентрации примесных соединений в трансформаторном масле. Анализ литературных данных показал, что на этой стадии аналитической процедуры могут возникать существенные погрешности, которые ухудшают качество контроля технического состояния маслonaполненного электрооборудования, а в некоторых случаях сделают его результаты бессмысленными. В опубликованных литературных источниках практически не обсуждается проблема пробоподготовки трансформаторного масла, что негативно сказывается на качестве аналитического контроля, то есть на надежности получаемых результатов и соответственно на диагностике маслonaполненного электрооборудования. В работе обсуждается система пробоподготовки трансформаторного масла, в основу которой положены различные методы выделения из него целевых компонентов. Используется процесс адсорбции, получение химических производных, различные виды экстракции, жидкостную, газовую, твердофазную и флюидную, а также с использованием низких температур, экстракции в микроволновых, магнитных, электромагнитных и центробежных полях. *МЕТОДЫ.* Показано, что из всех методов пробоподготовки широко применяется жидкостная экстракция органическим растворителем, с помощью которой из трансформаторного масла извлекаются фурановые соединения, образующиеся в результате деструкции бумажной изоляции. Обсуждаются недостатки пробоподготовки с помощью жидкофазной экстракции и возможности использования для этой цели твердофазной экстракции на различных адсорбентах. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Приведены результаты экспериментальных исследований сорбционных свойств различных органических растворителей по отношению к пористым материалам, отличающихся структурой их поверхности. Использовали цеолитсодержащие породы Татарско-шатиранского месторождения, синтетические цеолиты NaX-13^A. Методом восходящего варианта жидкостной колоночной хроматографии определены абсолютные величины удерживания стандартных экстрагентов и найдены их зависимости от длины сорбционного слоя пористого материала. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Показано, что наиболее высокие величины времени удерживания на всех исследуемых адсорбентах наблюдаются для хлорорганических экстрагентов, хлороформа, четыреххлористого углерода, дихлорэтана, трихлорэтилена. Для н. Гексан это взаимодействие относительно небольшие. Приведены гистограммы влияние времени удерживания стандартных сорбатов (экстрагентов) от их физико-химические природы.

Ключевые слова: электрооборудование, трансформаторное масло, контроль, сорбент, деструкция, экстракция, хроматография, удерживания, растворитель.

Для цитирования: Ву Нгок Зан, Новиков В.Ф. Хроматографические методы исследования органических экстрагентов трансформаторного масла // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 202-210. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-202-210.

CHROMATOGRAPHIC METHODS FOR THE STUDY OF ORGANIC EXTRACTANTS OF TRANSFORMER OIL

Vu Ngoc Dan, BF. Novikov
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
vndan@cnd.edu.vn

Abstract: THE PURPOSE. In order to control the technical condition of oil-filled electrical equipment, a number of new analytical methods have recently been created to determine the ultra-low concentrations of impurity compounds in transformer oil. An analysis of the literature data showed that at this stage of the analytical procedure significant errors may occur that worsen the quality of control of the technical condition of oil-filled electrical equipment, and in some cases make its results meaningless. The published literature practically does not discuss the problem of sample preparation of transformer oil, which negatively affects the quality of analytical control, that is, the reliability of the results and, accordingly, the diagnosis of oil-filled electrical equipment. **METHODS.** The paper discusses a sample preparation system for transformer oil, which is based on various methods for extracting target components from it. The adsorption process is used, the preparation of chemical derivatives, various types of extraction, liquid, gas, solid phase and fluid, as well as using low temperatures, extraction in microwave, magnetic, electromagnetic and centrifugal fields. It is shown that liquid extraction with an organic solvent is widely used from all sample preparation methods, with the help of which furan compounds resulting from the destruction of paper insulation are extracted from transformer oil. The disadvantages of sample preparation using liquid-phase extraction and the possibility of using solid-phase extraction on various adsorbents for this purpose are discussed. **RESULTS.** The results of an experimental study of the sorption properties of various organic solvents with respect to porous materials differing in the structure of their surface are presented. We used zeolite-bearing rocks of the Tatar-Shatrashansky deposit, synthetic zeolites NaX-13^A. Using the ascending variant of liquid column chromatography, the absolute retention values of standard extractants were determined and their dependence on the length of the sorption layer of the porous material was found. **CONCLUSIONS.** It was shown that the highest retention times for all studied adsorbents are observed for organochlorine extractants, chloroform, carbon tetrachloride, dichloroethane, trichlorethylene. For N. Hexane is a relatively small interaction. Histograms are given of the effect of the retention time of standard sorbates (extractants) on their physicochemical nature.

Key words: electrical equipment, transformer oil, control, sorbent, destruction, extraction, chromatography, retention, solvent.

For citation: Vu Ngoc Dan, Novikov BF. Chromatographic methods for the study of organic extractants of transformer oil. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(6):202-210. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-202-210.

Введение

Для контроля технического состояния маслонаполненного электрооборудования в последнее время создан ряд новых аналитических методик, позволяющих определять ультрамалые концентрации примесных соединений в трансформаторном масле. При этом пробоподготовке трансформаторного масла не уделяется достаточного внимания. Анализ литературных данных показал, что на этой стадии аналитической процедуры могут возникать существенные погрешности, которые ухудшают качество контроля технического состояния маслонаполненного электрооборудования, а в некоторых случаях сделают его результаты бессмысленными. В опубликованных литературных источниках практически не обсуждается проблема пробоподготовки трансформаторного масла, что негативно сказывается на качестве аналитического контроля, то есть на надежности получаемых результатов и соответственно на диагностике маслонаполненного электрооборудования.

Как известно пробоподготовка трансформаторного масла включает все операции, которым подвергается проба, начиная с ее отбора, транспортировки в испытательную лабораторию и заканчивая ее вводом в аналитическую систему [1-3].

Подготовка пробы заключается в следующих операциях: отбор пробы трансформаторного масла из бака силового трансформатора, транспортировка пробы в испытательную лабораторию; консервация пробы и их хранение; подготовка пробы к последующему анализу; инструментальный метод анализа пробы; на основе результатов анализа диагностика технического состояния маслонаполненного электрооборудования.

Система пробоподготовки трансформаторного масла основана на выделении из него целевых компонентов, которые в дальнейшем возможно проанализировать различными инструментальными методами. С этой целью используют процесс адсорбции, получение химических производных и экстракцию, которая подразделяется на жидкостную, газовую, твердофазную, сверхкритическую флюидную, а также с использованием низких температур [4-6]. Кроме того перспективным направлением является экстракция в микроволновых, магнитных, электромагнитных и центробежных полях, которая позволяет разделить

компоненты трансформаторного масла на группы веществ. В этом случае процесс пробоподготовки трансформаторного масла можно легко автоматизировать, что приведёт к уменьшению погрешности определения анализируемых компонентов за счёт исключения влияние человеческого фактора [7-9].

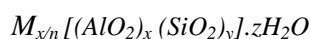
Материалы и методы

Из всех методов пробоподготовки трансформаторного масла наиболее широко применяется жидкостная экстракция, с использованием которой из трансформаторного масла извлекают фурановые соединения, которые образуются в силовых трансформаторах в результате деструкции бумажной изоляции. Эти соединения извлекают селективными растворителями с последующим их анализом с помощью высокоэффективной жидкостно-жидкостной, газовой и тонкослойной хроматографии [10-12].

Метод жидкостной экстракции имеет ряд существенных недостатков, заключающихся в неполном извлечении фурановых соединений из трансформаторного масла, использование относительно большого объёма токсичных растворителей, плохой воспроизводимости процесса жидкостной экстракции и др.

Более перспективным направлением в системе пробоподготовки трансформаторного масла является применение твердофазной экстракции, когда компоненты разделяются за счёт различия в энергии сорбции на пористых материалах с широко развитой системой макро и микро пор, а затем вымываются из адсорбента селективными растворителями и могут быть проанализированы различными инструментальными методами [13-15].

Для проверки этого положения нами было проведено исследование сорбционных свойств органических растворителей, используемых в различных вариантах хроматографии по отношению к различным пористым материалам. Экспериментальная часть работы проводили методом восходящей жидкостной колоночной хроматографии, на колонках длиной 120 мм и внутренним диаметром 4 мм. Органический растворитель заливался в вials и он поднимался по сорбционному слою пористого материала за счёт капиллярных сил. Через каждые 10 мм подъёма растворителя фиксировали его время, а сорбционную ёмкость определяли гравиметрическим методом по разности масс сорбируемого растворителя на длине слоя в 100 мм. В качестве пористого материала использовали цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашановского месторождения, которые являются водными каркасными алюмосиликатами щелочных и щелочноземельных металлов с обобщённой эмпирической формулой [16].



где: M – катион с валентностью n , z – число молекул воды.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведен элюотропный ряд используемых хроматографических растворителей и их физико-химические свойства.

Таблица 1

Элюотропный ряд хроматографических растворителей – Диэлектрическая проницаемость; $T_{\text{кип.}}^{0\text{C}}$ – Температура кипения; d_u^{20} – Плотность; n_d^{20} Показатель преломления; cP^{20} – Вязкость; μ^{20} – Дипольный момент).

| № | Растворитель | ϵ_{20}^0 | $T_{\text{кип.}}^{0\text{C}}$ | d_u^{20} | n_d^{20} | cP^{20} | μ^{20} |
|---|--------------|-------------------|-------------------------------|------------|------------|-----------|------------|
| 1 | Н.-Гексан | 0,00 | 69,0 | 0,660 | 1,416 | 0,32 | 0,05 |
| 2 | Толуол | 0,29 | 111,0 | 0,866 | 1,497 | 0,58 | 0,06 |
| 3 | Бензон | 0,32 | 80,0 | 0,879 | 1,501 | 0,65 | 0,00 |
| 4 | Хлороформ | 0,40 | 62,0 | 1,480 | 1,144 | 0,57 | 1,15 |
| 5 | Дихлоэтан | 0,44 | 83,0 | 1,253 | 1,445 | 0,79 | 1,75 |
| 6 | Ацетон | 0,56 | 56,0 | 0,791 | 1,359 | 0,32 | 2,70 |
| 7 | Этилацетат | 0,58 | 77,0 | 0,900 | 1,373 | 0,45 | 2,48 |
| 8 | Этанол | 0,88 | 78,0 | 0,789 | 1,361 | 1,20 | 1,68 |

Как видно из табл. 1 из всего ряда хроматографических растворителей наиболее высокая диэлектрическая проницаемость характерна для этанола. Однако область его применения в качестве экстрагента ограничивается его высокой гигроскопичностью и наличие относительно большого количества воды. Этанол и этилацетат имеют близкие значения температуры кипения, однако сильно отличаются по плотности и вязкости. Кроме того этилацетатом по сравнению с этанолом имеет более высокое значение дипольного момента $\mu^{20}=2,48$.

Предварительно было проведено исследование отработанного трансформаторного масла марки Гк-1 с помощью радиальной тонкослойной хроматографии на пластинках

«Sorbfil». В качестве элюента использовался уайт-спирит, который состоит из смеси углеводородов различной структуры. Трансформаторное масло объемом 1 мкл с помощью микрошприца наносили в центр тонкослойной пластинки, на которую затем с постоянной скоростью подавали уайт-спирит. Как видно из рис.1. трансформаторное масло марки Гк-1 имеет сложный углеводородный состав, который состоит из шести групп компонентов. Это смолы, асфальтены, нафеновые, парафиновые, ароматические углеводороды, а также продукты деструкции трансформаторного масла в виде шлама, который обладает низкой подвижностью и остается в центральной области тонкослойной пластинки.

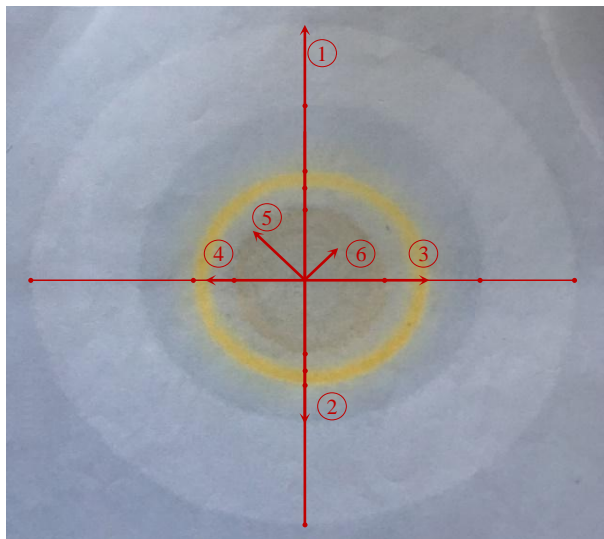


Рис.1. Радиальная хроматограмма отработанного трансформаторного масла марки Гк-1 на тонкослойных пластинках «Sorbfil». Растворитель: Уайт-спирит. Порядок элюирования групп компонентов: 1 - Парафиновые углеводороды, 2 - Нафеновые углеводороды, 3 - Ароматические углеводороды, 4 - Асфальтены, 5 - Смолы, 6 - Шлам.

В табл. 2 приведено абсолютное время удерживания растворителей на синтетических и природных цеолитах.

Таблица 2

Абсолютное время удерживания органических растворителей по длине сорбционного слоя в 100 мм природных и синтетических цеолитов.

| №/пп | Растворитель | $T_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$ | Дипольный момент, μ_D | Время удерживание, $t_{\text{уд}}$ (мин) | |
|------|----------------|----------------------------------|---------------------------|--|------------------------------|
| | | | | Цеолит природный | Цеолит синтетический NaX-13A |
| 1 | Хлороформ | 61,2 | 1,15 | 58,4 | 78,5 |
| 2 | н.-Гексан | 68,0 | 0,05 | 29,4 | 44,5 |
| 3 | Тетрахлорметан | 76,7 | 0 | 56,6 | 106,1 |
| 4 | Этилацетат | 77,1 | 2,48 | 89,2 | 26,3 |
| 5 | Метилэтилкетон | 79,6 | 2,84 | 50,4 | 143,0 |
| 6 | Дихлорэтан | 83,6 | 1,75 | 88,5 | 69,5 |
| 7 | Трихлорэтилен | 87,2 | 0,85 | 33,8 | 53,5 |
| 8 | о.-Ксилол | 144,4 | 0,62 | 69,0 | 57,1 |

Как видно из таблицы время удерживания органических растворителей на синтетических цеолитах отличается от природы что связывается с их структурными особенностями.

На рис 2 представлен график зависимости абсолютного времени удерживания органических растворителей от длины сорбционного слоя цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения (природные цеолиты). Из рис. видно, что время удерживание органических растворителей исследуемым сорбентом определяется их природой. Так, наиболее низкие величины удерживания характерны для н.-гексана, который является неполярным растворителем с дипольным моментом, близким к нулю. В тоже время непонятный тетрачлорметан, имеющий более высокую температуру кипения, элюируется из хроматографической колонки позже н.-гексана. Как для цеолитсодержащей

породы Татарско-Шатрашановского месторождения, так и в случае синтетических цеолитов NaX-13A. При этом синтетический цеолит NaX-13A характеризуется более высоким значениям времени удерживания по сравнению с цеолитсодержащей породой Татарско-Шатрашановского месторождения как для н-гексана, так и тетрахлорметана. Высокие значения времени сорбции неполярных соединений на синтетическом цеолите, повидимому определяется более регулярным распределением пор по размерам за счёт сотового эффекта.

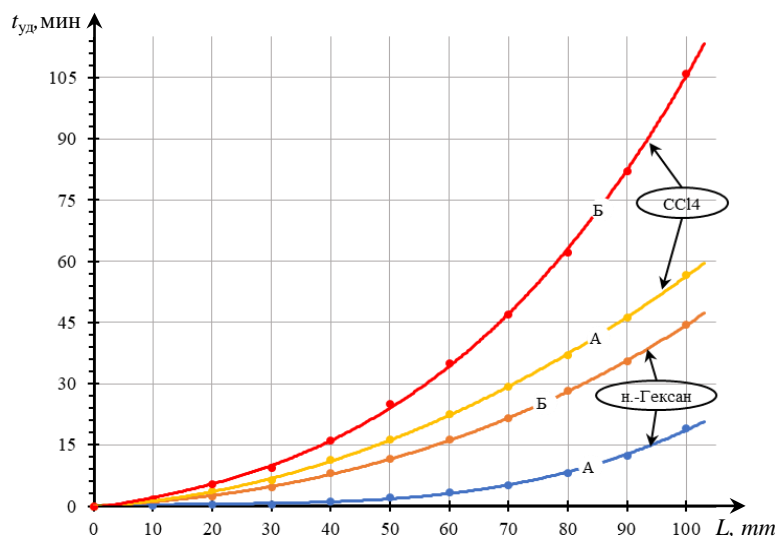
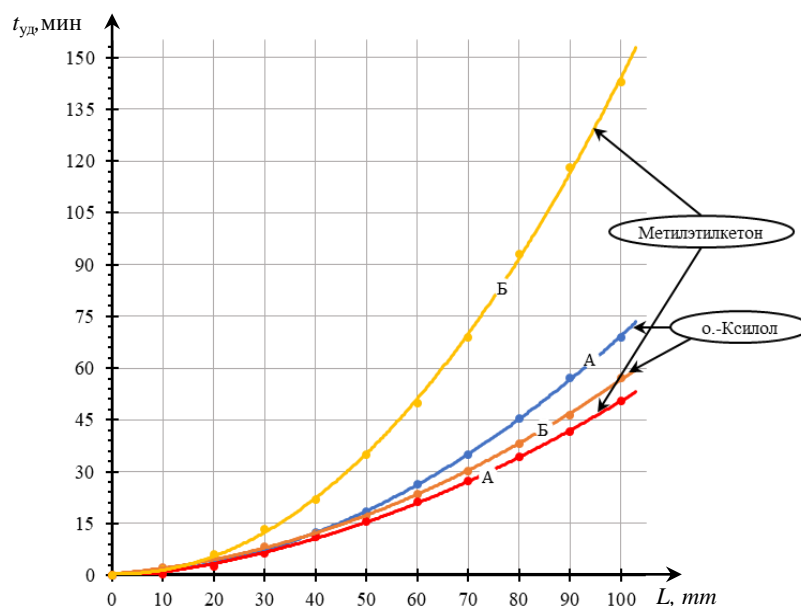


Рис. 2. Зависимость абсолютного времени удерживания н-гексана и тетрахлорметана от длины сорбционного слоя различных адсорбентов: А - Цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашановского месторождения; Б - Цеолит синтетический NaX-13A.

На рис. 3 приведена зависимость абсолютного времени удерживания метилэтилкетона с дипольным моментом $\mu_D=2,84$ и о.-ксилола с дипольным моментом $\mu_D=0,62$. При этом о.-ксилол имеет близкие величины абсолютного времени удержания как для природных так и синтетических цеолитов. Это, очевидно связано со структурными особенностями о.-ксилола, молекулы которого не может проникнуть в поры как синтетического так и природного цеолита в результате стерических затруднений. В данном случае наблюдается орто эффект заместителя. Напротив абсолютное время удерживания метилэтилкетона имеет экстремально высокие значения для синтетического цеолита по



сравнению с природным материалом.

Рис. 3. Зависимость абсолютного времени удерживания о.-ксилола и метилэтилкетона от длины сорбционного слоя различных адсорбентов: А - Цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашановского месторождения; Б - Цеолит синтетический NaX-13A

На рис. 4 приведена гистограмма, показывающая влияние абсолютного времени удержания органических растворителей от их физико-химической природы на различных адсорбентах. Как видно из рис. для синтетических цеолитов экстремально высокие значения времени удерживания являются характерными для н.-гексана, трихлорэтилена, хлороформа и метилэтилкетона. Для цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашановского месторождения экстремально высокие значения абсолютных время удерживания наблюдаются для о.-кислота, дихлорэтана и этилацетата. Такие различия в сорбируемости органических растворителей природными и синтетическими цеолитами очевидно определяются их структурными особенностями кристаллической решетки и степень доступности к взаимодействию с сорбционными центрами.

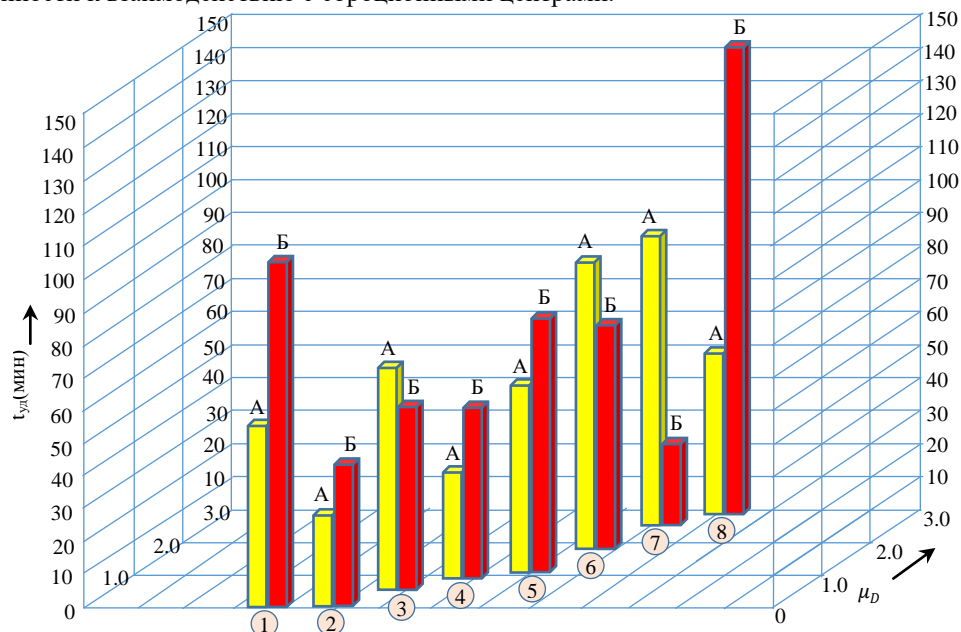


Рис. 4. Гистограмма влияние времени удерживания стандартных сорбатов от их природы и дипольного момента. Растворители: 1: Углерод 4-х хлористый; 2: н-Гексан; 3: о-Кислота; 4: Трихлорэтилен; 5: Хлороформ; 6: Дихлорэтан; 7: Этилацетат; 8: Метилэтилкетон. Сорбенты: А: Цеолит природный Татарско-Шатрашановского месторождения; Б: Цеолит синтетический NaX-13A.

Как видно из рис.4 наиболее высокие значения величины удерживаемого объёма сорбатов наблюдаются для углерода четыреххлористого, который имеет нулевой дипольный момент.

В условиях эксплуатации трансформаторного электрооборудования фурфурол превращается в фурфуроловый спирт, который можно использовать в качестве тестового вещества. Для определения фурфуролового спирта в трансформаторном масле, использовали сорбцию трансформаторного масла пористыми материалами.

На рис. 5 приведена хроматограмма разделения трансформаторного масла на индивидуальные компоненты, из которой видно, что их количество составляет больше 250 соединений, кипящих в широком температурном интервале. Из рис. также видно, что как при сорбции так и экстракции органическими растворителями происходит удаление высококипящих компонентов трансформаторного масла, что ускоряет процесс анализа фурфуролового спирта в трансформаторном масле.

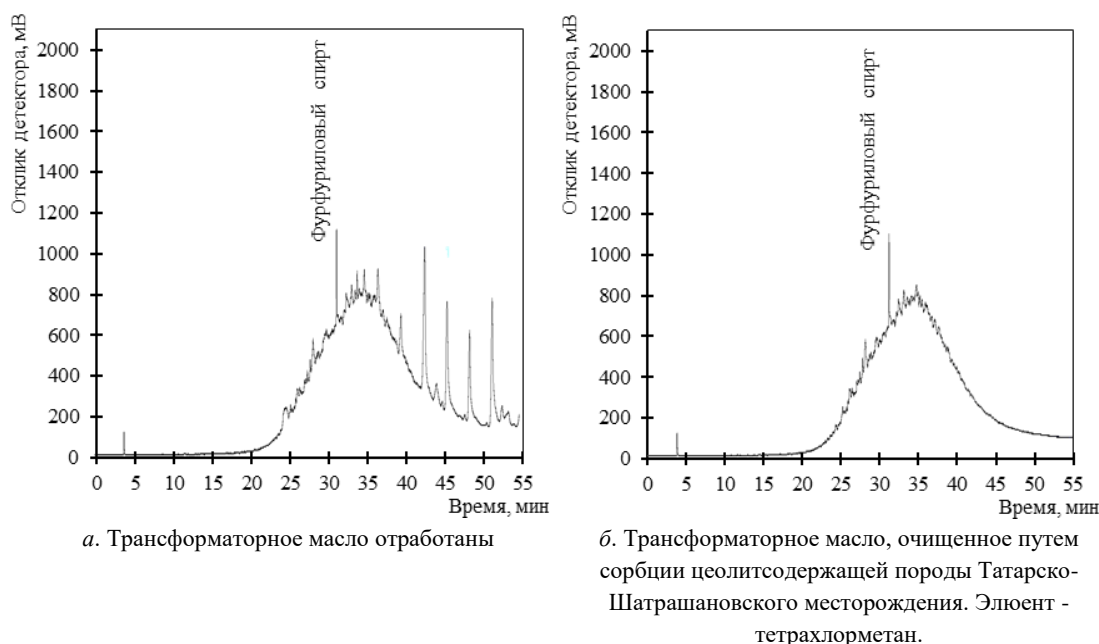


Рис. 5. Хроматограмма разделения индивидуальных компонентов трансформаторного масла и фурфурилового спирта

Условие анализа: Газо-жидкостный хроматограф «Хромос ГХ - 1000» с пламенно-ионизационным детектором. Колонка капиллярная кварцевая длиной 30м., внутренним диаметром 0,32мм, заполненная неподвижной фазой Vako BoHa VB WAX P/n CF 5903032050A. Скорость газа носителя 0,05мл/мин. Линейное программирование температуры колонки от 40оС до 250оС со скоростью подъема температура пять градусов в минуту.

Как видно из приведенной хроматограммы фурфуриловый спирт, образующийся в результате деструкции бумажной изоляции и лизирующий в трансформаторное масло можно определять непосредственно с использованием капиллярной хроматографической колонки с полярной неподвижной фазой. При этом время его удерживание составляет 30 мин. Ограничением прямого ввода пробы трансформаторного масла в инжектор газо-жидкостного хроматографа является возможность засорения хроматографической колонки тяжелыми компонентами трансформаторного масла. Поэтому после проведения каждого анализа хроматографическую колонку необходимо кондиционирование при повышенной температуре.

Заключение

На основе проведенных исследований показано, что отработанное трансформаторное масло можно анализировать с использованием радиальной тонкослойной хроматографии, с помощью которой возможно определение группового состава. Фурфуриловый спирт, образующийся в результате деструкции бумажной изоляции можно контролировать путем непосредственного анализа на капиллярной колонке с полярной неподвижной жидкой фазой.

Литература

1. Сычев К.С., Даванков В.А.. Материалы и методы пробоподготовки в хроматографии: твердофазное концентрирование и адсорбционная очистка. Обзор. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2004. Т.4. №1. С. 5-28.
2. Карпов Ю.А., Савостин. Методы пробоотбора и пробоподготовки. М. : БИНОМ, 2015. 246 с.
3. Шелпакова И.Р. Косяков В.И. О системном подходе к разработке методик концентрирования примесей отгонкой основы пробы в анализе веществ высокой чистоты // Аналитика и контроль. 1998. №3-4. С. 26-40.
4. Dias A.L.B., Cunha G.N., Santos P., et al. Fusel oil: Water adsorption and enzymatic synthesis of acetate esters in supercritical CO₂// The Journal of Supercritical Fluids. 2018. V. 142. P. 22-31.
5. Dias A.L.B., Santos dos P., Martínez J. Supercritical CO₂ technology applied to the production of flavor ester compounds through lipase-catalyzed reaction: a review // Journal of CO₂ Utilization. 2018. V. 23. P. 159-178.

6. Santosdos P., Meireles M.A.A., Martínez J. Production of isoamyl acetate by enzymatic reactions in batch and packed bed reactors with supercritical CO₂ // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2017. V. 127. P. 71-80.
7. Montoya N., Duran J., Cordoba F., et al. Colombian fusel oil El aceite de fusel de Colombia // *Ingenieriae Investigacion*. 2016. Vol. 36. P. 21-27.
8. Santos P., Rezende C.A. Martinez J. Activity of immobilized lipase from *Candida antarctica* (Lipozyme 435) and its performance on the esterification of oleic acid in supercritical carbon dioxide // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2016. V. 107. P. 170-178.
9. Santos P., Zabot G.L., Meireles M.A.A., et al. Synthesis of Eugenyl Acetate by Enzymatic Reactions in Supercritical Carbon Dioxide // *Biochemical Engineering Journal*. 2016. V. 114. P. 1-9.
10. Zuway K.Y., Smith J.P., Foster C.W., et al. Detection and quantification of new psychoactive substances (NPSs) within the evolved "legal high" product, NRG-2, using high performance liquid chromatography-amperometric detection (HPLC-AD) // *Analyst*. 2015. V. 140. P. 6283-6294.
11. Rivoira L., De Carlo R.M., Cavalli S., et al. Simple SPE-HPLC determination of some common drugs and herbicides of environmental concern by pulsed amperometry // *Talanta*. 2015. V. 131. P. 205-212.
12. Butler O., Forder J., Saunders J. Analytical protocol for the sensitive determination of mannitol, sorbitol and glucose containing powders in pharmaceutical workplaces by ion chromatography using a pulsed amperometric detector // *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2015. V. 106. P. 204-209.
13. Чижков В.П., Бойцов В. Н. Обобщенная теория хроматографии и многоступенчатой жидкостной экстракции // *Журнал физической химии*. 2017. Т 91. № 3. С. 549-557.
14. Карташова А.А., Новиков В.Ф. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле газохроматографическим методом с использованием новых сорбентов // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 1-2, С. 47-52.
15. Новиков В.Ф., Карташова А.А., Танеева А.В. Инструментальные методы анализа. В трех частях. Ч.III. Газохроматографический контроль производственных процессов в энергетике: Монография. Под редакцией профессора В.Ф. Новикова. Казань: Казан. гос. энерг. ун - т. 2018. 328 с.
16. Буров А.И., Тюрин А.Н., Якимов А.В. и др. Цеолитсодержащие породы Татарстана и их применение. Казань: издательство «ФЭН» АН РТ. 2001. 176 с.

Авторы публикации

Бу Нгок Зан – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Новиков Вячеслав Федорович – д-р хим. наук, профессор, кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Sychev KS, Davankov VA. Materialy i metody probopodgotovki v khromatografii: tverdogaznoe kontsentririrovanie i adsorbtsionnaya ochistka. Obzor. *Sorbtsionnye I khromatograficheskie protsessy*. 2004;4(1):С. 5-28.
2. Karpov YuA, Savostin. Metody probopodgotovki i probopodgotovki. M.: BINOM, 2015;24.
3. Shelpakova IR, Kosyakov VI. O sistemnom podkhode k razrabotke metodik kontsentririrovaniya primesei otgonkoi osnovy proby v analize veshchestv vysokoichistoty. *Analitika I kontrol'*. 1998;3-4:26-40.
4. Dias ALB, Cunha GN, Santos P, et al. Fusel oil: Water adsorption and enzymatic synthesis of acetate esters in supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018;142:22-31.
5. Dias ALB, Santos dos P, Martínez J. Supercritical CO₂ technology applied to the production of flavor ester compounds through lipase-catalyzed reaction: a review. *Journal of CO₂ Utilization*. 2018;23:159-178.
6. Santos dos P, Meireles M.A.A, Martínez J. Production of isoamyl acetate by enzymatic reactions in batch and packed bed reactors with supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2017;127:71-80.
7. Montoya N, Duran J, Cordoba F, et al. Colombian fusel oil El aceite de fusel de Colombia. *Ingenieria e Investigacion*. 2016;36:21-27.
8. Santos P, Rezende C.A, Martinez J. Activity of immobilized lipase from *Candida antarctica* (Lipozyme 435) and its performance on the esterification of oleic acid in supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2016;107:170-178.
9. Santos P, Zabot GL, Meireles M.A.A, et al. Synthesis of Eugenyl Acetate by Enzymatic Reactions in Supercritical Carbon Dioxide. *Biochemical Engineering Journal*. 2016;114:1-9.
10. Zuway KY, Smith JP, Foster CW, et al. Detection and quantification of new psychoactive substances (NPSs) within the evolved "legal high" product, NRG-2, using high performance liquid chromatography-amperometric detection (HPLC-AD). *Analyst*. 2015;140:6283-6294.

11. Rivoira L, De Carlo RM, Cavalli S, et al. Simple SPE-HPLC determination of some common drugs and herbicides of environmental concern by pulsed amperometry. *Talanta*. 2015;131:205-212.
12. Butler O, Forder J, Saunders J. Analytical protocol for the sensitive determination of mannitol, sorbitol and glucose containing powders in pharmaceutical workplaces by ion chromatography using a pulsed amperometric detector. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*. 2015;106:204-209.
13. Chizhkov VP, Boitsov VN. Obobshchennaya teoriya khromatografii i mnogostupenchatoi zhidkostnoi ekstraktsii. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2017;91(3):549-557.
14. Kartashova AA, Novikov VF. Opredelenie furanovykh soedinenii v transformatornom masle gazokhromatograficheskim metodom s ispol'zovaniem novykh sorbentov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2016;1-2:47-52.
15. Novikov VF, Kartashova AA, Taneeva AV. Instrumental'nye metody analiza. V trekhchastyakh. Ch.III. Gazokhromatograficheskii kontrol' proizvodstvennykh protsessov v energetike: Monografiya. Pod redaktsiei professora VF. Novikova. Kazan': Kazan. gos. energ. un - t. 2018. 328 P.
16. Burov AI, Tyurin AN, Yakimov AV. i dr. Tseolit sodержashchie porody Tatarstana I Ikh primeneniye. Kazan': izdatel'stvo «FEN» ANRT. 2001. 176 P.

Authors of the publication

Vu Ngoc Dan – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Vyacheslav F. Novikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

16 октября 2020 г.

Отредактировано

19 ноября 2020г.

Принято

03 декабря 2020г.