



ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕСС РАЗДЕЛЕНИЯ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДКИ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ ГАЗО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Нгуен Зуи Хынг, Ю.В. Снигирева, А.В.Танеева, В.Ф. Новиков

Казанский государственный энергетический университет,

г. Казань, Россия

hungnguyenat73@gmail.com

Резюме: ЦЕЛЬ. В работе рассмотрено влияние природы органических растворителей на процесс разделения антиокислительной присадки, добавляемой в трансформаторное масло в концентрации до 0,40% от массы, и органических растворителей, используемых в качестве селективных экстрагентов. На основе анализа литературных данных показано, что минеральное трансформаторное масло представляет собой сложную углеводородную композицию, которая в процессе эксплуатации подвергается окислительной деструкции, приводящей к старению трансформаторного масла и ухудшению технических условий эксплуатации трансформаторного электрооборудования. В результате этого процесса в трансформаторном масле появляются перекисные соединения, оказывающие влияние на его цвет, стабильность к окислению, устойчивость к старению, совместимость с конструкционными деталями оборудования и др. Для определения в трансформаторном масле антиокислительной присадки «Ионол» и органических экстрагентов использовали метод газо-жидкостной хроматографии. Эксперименты проводили на Хроматографе Хромос ГХ-1000 с пламенно-ионизационным детектором и кварцевой капиллярной колонкой длиной 30м, внутренним диаметром 0,32мм, заполненной неподвижной жидкой фазой ValkoBondVB-WAXP/n с толщиной пленки 0,5мкм. Дозировку пробы в инжектор газо-жидкостного хроматографа проводили с помощью автоматического жидкостного дозатора ДАЖ-23, рассчитанного на ввод до двадцати трех проб сорбатов и управляемого компьютером с соответствующим программным обеспечением.

МЕТОДЫ. В качестве экстрагентов антиокислительной присадки исследовали алифатические спирты от C_1 до C_5 , которые хорошо разделяются с ионолом как в изотермических условиях, так и в режиме линейного программирования температуры колонки от 40 до 220 °С. В этих условиях получены хроматограммы разделения антиокислительной присадки и алифатических спиртов, на основе которых рассчитаны их относительные удерживаемые объёмы, коэффициенты асимметрии хроматографических пиков и эффективность колонки, которая зависит от физико-химической природы анализируемых сорбатов и условий проведения хроматографического эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлена зависимость относительного объёма удерживания алифатических спиртов от их диэлектрической проницаемости, которая имеет нелинейный вид. При этом с уменьшением длины цепи алкильных заместителей в молекуле алифатических спиртов наблюдается тенденция повышения их диэлектрической проницаемости. Зависимость относительного удерживаемого объёма алифатических спиртов от коэффициента селективности разделения с Ионолом является линейной. При этом наиболее оптимальная селективность разделения, приближающаяся к единице, является характерной для пары Ионол–Бутанол-1. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Показано, что зависимость логарифма времени удерживания алифатических спиртов от их температур кипения является линейной как при низкой температуре хроматографической колонки (40 °С), так и при более высокой (более 100 °С). При этом в области температур кипения органических растворителей изменяется угол наклона соответствующих прямых, что связывается с изменением механизма сорбции в капиллярной хроматографической колонке, заполненной полярной неподвижной фазой.

Ключевые слова: трансформаторное масло, электрооборудование, контроль, сорбат, сорбент, экстрагент, хроматография, удерживание, растворитель.

Для цитирования: Нгуен Зуи Хынг, Снигирева Ю.В., Танеева А.В., Новиков В.Ф. Влияние природы органических растворителей на процесс разделения антиокислительной присадки в трансформаторном масле газо-хроматографическим методом // Известия высших учебных

**INFLUENCE OF THE NATURE OF ORGANIC SOLVENTS ON THE PROCESS
OF SEPARATION OF ANTIOXIDATIVE ADDITIVE IN A TRANSFORMER OIL
BY A GAS-CHROMATOGRAPHIC METHOD**

Nguyen Duy Hung, Snigireva YuV, Taneeva AV, Novikov VF

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

hungnguyenat73@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE.* The paper considers the influence of the nature of organic solvents on the process of separation of an antioxidant additive added to transformer oil at a concentration of up to 0.40% by weight, and organic solvents used as selective extractants. Based on the analysis of literature data, it is shown that mineral transformer oil is a complex hydrocarbon composition that undergoes oxidative degradation during operation, leading to aging of transformer oil and deterioration of technical conditions of operation of transformer electrical equipment. As a result of this process, peroxide compounds appear in transformer oil, which affect its color, oxidation stability, aging resistance, compatibility with structural parts of equipment, etc. Gas-liquid chromatography was used to determine the "Ionol" antioxidant additive and organic extractants in transformer oil. Experiments were performed on a chromatograph of Chromosomes GC-1000 with a flame ionization detector and a quartz capillary column 30 m long, 0.32 mm in diameter, filled with a fixed liquid phase Valko Bond VB-WAX P/n with a film thickness of 0.5 microns. The sample was dosed into the gas-liquid chromatograph injector using an automatic liquid dispenser DAZH-23, designed for entering up to twenty-three samples of sorbates and controlled by a computer with the appropriate software.

METHODS. Aliphatic alcohols from C1 to C5 were studied as extractants of the antioxidant additive, which are well separated from the ionol both under isothermal conditions and in the mode of linear programming of the column temperature from 40 to 220 °C. Under these conditions the chromatogram of the separation of antioxidant additives, and aliphatic alcohols, which are used to calculate their relative retained volumes, the asymmetry of chromatographic peaks and the column efficiency, which depends on the physico-chemical nature of the solutes to be analyzed and the conditions of the chromatographic experiment.

RESULTS. The dependence of the relative volume of retention of aliphatic alcohols on their permittivity, which has a nonlinear form, is established. At the same time, with a decrease in the chain length of alkyl substituents in the aliphatic alcohol molecule, there is a tendency to increase their permittivity. The dependence of the relative retained volume of aliphatic alcohols on the selectivity coefficient of separation with Ionol is linear. In this case, the most optimal separation selectivity, approaching one, is characteristic of the Ionol – Butanol-1 pair. It is shown that the dependence of the logarithm of the retention time of aliphatic alcohols on their boiling points is linear both at a low temperature of the chromatographic column (40 °C) and at a higher temperature (more than 100 °C). *CONCLUSION.* At the same time, the angle of inclination of the corresponding lines changes in the boiling point of organic solvents, which is associated with a change in the sorption mechanism in a capillary chromatographic column filled with a polar stationary phase.

Key words: transformer oil, electrical equipment, control, sorbate, sorbent, extractant, chromatography, retention, solvent.

For citation: Nguyen Duy Hung, Snigireva YuV, Taneeva AV, Novikov VF. Influence of the nature of organic solvents on the process of separation of antioxidative additive in a transformer oil by a gas-chromatographic method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):211-220. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-211-220.

Введение

Минеральное трансформаторное масло представляет собой очищенную фракцию нефти, кипящую при температуре от 300 до 400⁰С. В своем составе трансформаторное масло содержит от 10 до 15% парафиновых углеводородов, от 60 до 70% нафтеновых, от 15

до 20% ароматических углеводородов. Кроме того, в состав трансформаторного масла входят асфальто-смолистые вещества, сернистые и азотистые соединения а также нафтеновые кислоты [1]. В процессе эксплуатации силового маслонаполненного электрооборудования трансформаторное масло постоянно стареет, в результате чего ухудшаются его эксплуатационные характеристики и диэлектрические свойства. Поэтому важным свойством трансформаторного масла является его способность поддерживать технологические параметры, необходимые для длительной эксплуатации.

Для увеличения стабильности трансформаторного масла против окисления в него вводят антиоксидантную присадку 2,6-ди-трет-бутил-пара-крезол, торговое название «Ионол», которая вступает во взаимодействие с активными перекисными радикалами, обрывая их цепи [2-4]. Этот механизм ингибирования является обобщением и реализуется для всех фенольных антиоксидантов, например, 4,4'- бис (2,6-ди-трет-бутилфенол) который используется в качестве антиоксидантов в различных полимерных системах [5-7].

Установлено, что ионол успешно проявляет себя при взаимодействии с пластмассами, каучуками и подобными веществами. При использовании ионола возможно продлить время работы трансформаторного масла в 2-3 раза. Он также растворяется в масле при температуре в 30 °С, что дает возможность его использовать в качестве присадки, добавляемой в восстановленные трансформаторные масла практически при комнатной температуре. Еще одно достоинство ионола состоит в том, что его можно хранить после регенерации около трех лет и при этом он сохраняет свои антиокислительные свойства [8].

Основная причина старения трансформаторного масла заключается в окислительной деструкции их углеводородных компонентов, которая протекает по цепному свободно-радикальному механизму. Этот процесс сопровождается появлением в трансформаторном масле пероксидных соединений, а на поздних стадиях также кетонов, альдегидов, низкомолекулярных кислот и спиртов. Появление перекисных соединений оказывает влияние на физико-химические свойства трансформаторного масла и его цвет, стабильность к окислению устойчивость к старению, совместимость с другими материалами [9-10].

Трансформаторное масло является хорошей информационной средой и диагностическими признаками, которые позволяют вовремя получать информацию о техническом состоянии маслонаполненного электрооборудования по результатам анализа стабильности масла против окисления. При этом эффективность действия антиокислительных присадок сильно зависит от химической структуры трансформаторного масла и его физико-химических характеристик [11-12].

Для определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле используют хроматографические методы анализа, которые характеризуются хорошей воспроизводимостью получаемых результатов и низким пределом обнаружения [13-15].

Прямой хроматографический анализ антиокислительной присадки затруднен, так как трансформаторное масло имеет сложный углеводородный состав с широким интервалом температур кипения. Поэтому для ее определения используют стадию пробоподготовки трансформаторного масла с целью выделения из него ионола с последующим анализом на хроматографической аппаратуре. Наиболее часто для извлечения антиокислительной присадки из трансформаторного масла используют процесс жидкостной экстракции органическими растворителями, в качестве которых наиболее часто используют этанол. В процессе экстракции ионола из трансформаторного масла многие его компоненты этанолом не извлекаются и они в процессе анализа могут накладываться на хроматографический пик ионола, что искажает достоверное определение его концентрации и может привести к ошибочным результатам. Кроме того, в большинстве случаев газохроматографический анализ антиокислительной присадки проводится с использованием насадочных хроматографических колонок, что приводит к размыванию хроматографических пиков за счет влияния адсорбционных центров твердого носителя, не покрытых неподвижной жидкой фазой.

Присутствие воды в этаноле существенно ухудшает процесс экстракции ионола из трансформаторного масла. Поэтому необходимо выбрать экстрагенты для извлечения ионола из трансформаторного масла, которые характеризуются меньшей гигроскопичностью и в своем составе содержат незначительные количества воды и сопутствующих примесей.

Методика исследования

Экспериментальную часть работы проводили на газо-жидкостном хроматографе «Хромос ГХ – 1000», который предназначен для качественного и количественного анализа органических, неорганических, газообразных, жидких и твердых проб различных технологических объектов природного и промышленного происхождения. В хроматографе

используется многопроцессорная модульная система, в памяти которой хранятся рабочие настройки. Для проведения экспериментов использовали капиллярную колонку длиной 30 м, внутренним диаметром 0,32 мм, заполненную неподвижной фазой *Vako BoHa VB WAX P/n*, с толщиной пленки 0,5 мкм.

В качестве газа носителя использовали аргон, скорость которого через капиллярную колонку составляла 0,85 мл/мин. Скорость водорода 25 мл/мин, воздуха 250 см³/мин. Детектирование разделенных компонентов проводилось пламенно – ионизационным детектором с уровнем флуктуационных шумов нулевого сигнала не более $1 \cdot 10^{-14}$ А, с пределом детектирования по гептану в нонане $2,0 \cdot 10^{-14}$ г/с.

Дозировку пробы в инжектор газо-жидкостного хроматографа проводили с помощью дозатора автоматического жидкостного ДАЖ - 23, рассчитанного на ввод в испаритель хроматографа до двадцати трех образцов проб.

Определяли абсолютные времена удерживания анализируемых соединений на основе которых рассчитывали относительные объемы удерживания антиокислительной присадки:

$$V_{\text{отн}} = \frac{t_x - t_0}{t_{ct} - t_0} \quad (1)$$

где: t_x – время удерживания анализируемого компонента, мин; t_{ct} – время удерживания стандартного соединения, мин; t_0 – время удерживания несорбируемого компонента, мин.

При определении мёртвого объёма хроматографической колонки необходимо знать время удерживания несорбирующего компонента. Для его определения часто используют для пламенно-ионизационного детектора метан. Однако в условиях капиллярно-жидкостной хроматографии метан также может сорбироваться [16]. Поэтому нами использовался расчетный метод, который заключается в том, что в случае определения времени удерживания несорбирующего компонента используют линейную зависимость объёмов удерживания гомологических веществ от числа из атомов углерода. Вычисление этим методом проводили путем измерения отрезков на хроматограмме по расстоянию удерживания по схеме, приведенной на Рис.1.

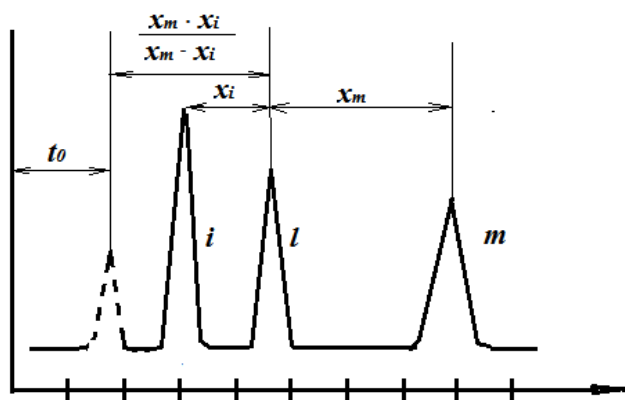


Рис.1. Графический способ оценки времени удерживания несорбирующего компонента.

Полученное соотношение для определения мертвого объёма непосредственно из хроматограммы и рассчитывается по следующей формуле [2]:

$$t_0 = t_i \frac{X_i \cdot X_m}{X_m - X_i} \quad (2)$$

где t_0 – время удерживания несорбирующего компонента; x_i и x_m – отрезки на хроматограмме между максимумов пиков компонентов i и m .

Для оценки «мертвого» объёма хроматографической колонки в качестве компонента m использовали антиокислительную присадку «Ионол», а в качестве компонентов i и l – алифатические спирты.

В качестве стандартного соединения для определения относительного удерживаемого объёма алифатических спиртов и антиокислительной присадки использовали н-Гексан. Коэффициент селективности хроматографической колонки при

разделении алифатических спиртов и антиокислительные присадки ионола рассчитывали как:

$$K_C = 2 \frac{t_{R_2} - t_{R_1}}{t_{R_2} + t_{R_1}} \quad (3)$$

где: t_{R_2} – абсолютное время удерживания алифатического спирта, мин; t_{R_1} – абсолютное время удерживания ионола, мин.

Для сбора и обработки хроматографических данных использовали программное обеспечение «Хромос», которые позволяет рассчитывать как качественный состав так и количественные содержания анализируемых компонентов.

Обсуждение результатов

Одним из основных методов продления срока эксплуатации трансформаторного масла является введение в него антиокислительной присадки, которая предотвращает образование осадков на твердых частях маслonaполненного электрооборудования и не изменяет физико-химических и эксплуатационных характеристик масла в течение достаточно продолжительного периода времени. В качестве антиокислительной трансформаторной присадки наиболее часто используют ионол, который относится к пространственно - затрудненным фенолам. Активированные молекулы ионола взаимодействуют с перекисными радикалами углеводородов трансформаторного масла и обрывают цепи окисления. Контроль содержания ионола в трансформаторном масле в основном осуществляется различными вариантами хроматографии: высокоэффективной жидкостной, газо - жидкостной и тонкослойной. Наиболее часто используют вариант газо-жидкостной хроматографии с использованием как насадочных так и капиллярных колонок. Трансформаторное масло представляет собой сложную смесь углеводородных и неуглеводородных композиций, кипящих в широком температурном интервале. Прямой хроматографический анализ ионола в трансформаторном масле является затруднительным, так как тяжелые компоненты трансформаторного масла будут загрязнять хроматографическую колонку, которую необходимо будет постоянно регенерировать, что существенно увеличивает время проведения эксперимента. Обычно для решения этой проблемы проводят процедуру пробоподготовки трансформаторного масла. С этой целью наиболее часто используют жидкостную экстракцию ионола из трансформаторного масла этанолом, который содержит значительное количество воды, оказывающей негативное влияние на процесс экстракции. Кроме того, в процессе газо-хроматографического анализа этанола присутствующая в нем вода подвергает гидролизу неподвижную жидкую фазу в хроматографической колонке, что существенно сокращает срок её эффективной эксплуатации. Для анализа ионола совместно с органическими растворителями, в качестве которых использовали алифатические спирты, применяли метод газо-жидкостной хроматографии. Анализ проводили на высокоэффективной хроматографической колонке в режиме программирования температуры.

На рис. 2 приведена хроматограмма разделения индивидуальных компонентов алифатических спиртов и ионола, которая показывает достаточно четкое их разделение.

При этом время удерживания ионола составляет около 38 мин, и этанола 8 мин, это приводит к тому, что в период времени около 30 мин хроматограф работает непроизводительно, так как расходуются энергетические ресурсы, газ - носитель, водород, воздух, изнашивается технологических детали хроматографа и т.д. Поэтому представляется целесообразным для извлечения ионола из трансформаторного масла использовать более высококипящие алифатические спирты, физико-химические свойства которых приведены в табл. 1.

Как видно из табл. все алифатические спирты имеют самые различные температуры кипения и близкие значения плотности. Для алифатических спиртов самая высокая диэлектрическая проницаемость характерна для метанола и она снижается по мере повышения температуры кипения спиртов. Для разветвленных спиртов, как правило, диэлектрическая проницаемость ниже, чем для нормальных. Например для бутанола - 1 $\epsilon_{20} = 17,7$ и для бутанола - 2 $\epsilon_{20} = 8,8$.

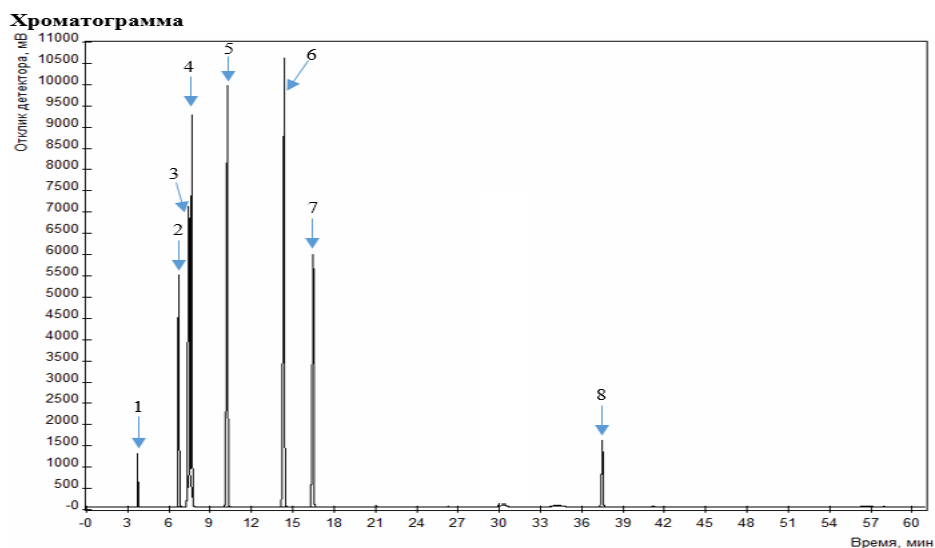


Рис. 2. Хроматограмма разделения индивидуальных компонентов и Ионولا на капиллярной колонке. Условия анализа: Хроматограф марки «Хромос ГХ - 1000», с пламенно-ионизационным детектором, колонка капиллярная кварцевая длиной 30 м., с внутренним диаметром 0,32 мм, заполненная *ValkoBondVB-WAXP/nCF* 5903032050A. С толщиной пленки 0,5 мкм, со ступенчатым программированием температуры, с началом 50°C, выдержка при этой температуре до 220°C со скоростью 5° и выдержка при этой температуре 5 мин. Порядок выхода компонентов: 1. Метанол; 2 – Пропанол -2; 3. Этанол; 4 – Пропанол -1; 5– Бутанол -2; 6 – Бутанол -1; 7– Аминол – 2; 8 – Ионол.

Таблица 1

Физико-химические и хроматографические свойства органических экстрагентов и антиокислительной присадки «Ионол» для трансформаторного масла. $T_{кип.}^0$ – Температура кипения экстрагентов; ρ_d^{20} – плотность при температуре 20°C; ϵ_{20} – диэлектрическая проницаемость; $H_2O, \%$ – массовый процент воды; N_M – число теоретических тарелок на один метр хроматографической колонки; K_A – коэффициент асимметрии хроматографических пиков; $t_{уд.}$ – Абсолютно время удерживания анализируемого сорбата, мин.

$N_{\text{т.т.}}$	вещество	$T_{кип.}^0$	ρ_d^{20}	ϵ_{20}	$H_2O, \%$	N_M	K_A	$t_{уд.}$	$V_{отн.}$
1	Н-Гексан	69,0	0,66	1,9	0,01	39	0,66	1,86	1,00
2	Метанол	64,7	0,79	33,0	0,08	790	1,95	3,71	1,99
3	Этанол	78,4	0,81	25,0	4,00	742	0,61	7,44	4,00
4	Пропанол - 2	82,6	0,78	19,0	0,10	1103	1,08	6,70	3,60
5	Пропанол - 1	97,0	0,80	21,0	0,10	1699	0,61	7,65	4,11
6	Бутанол - 2	108,0	0,80	8,80	0,20	1518	0,41	10,24	5,50
7	Бутанол - 1	118,0	0,81	17,7	0,05	2683	0,33	14,38	7,73
8	Аминол - 2	132,0	0,81	14,7	0,10	3527	0,40	16,49	8,86
9	Ионол	265,0	1,048	-	-	22120	0,66	37,50	20,16

При этом зависимость относительного объема удерживания алифатических спиртов от их диэлектрической проницаемости является нелинейной (рис. 3)

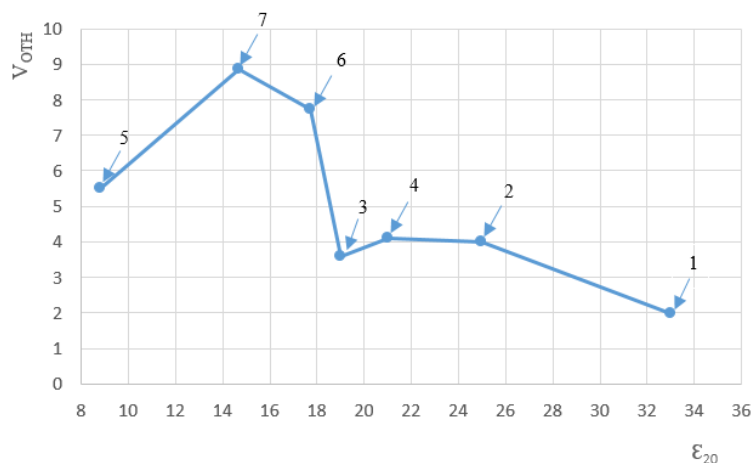


Рис. 3. Зависимость относительного объема удерживания алифатических спиртов ($V_{отн}$) от их диэлектрической проницаемости (ϵ_{20}). 1. Метанол; 2. Этанол 3. Пропанол -2; 4. Пропанол -1; 5. Бутанол -2; 6. Бутанол -1; 7. Аминол – 2

В табл. 2 приведены численные значения коэффициентов селективности разделения антиокислительной присадки и ионола на капиллярной колонке с программированием температуры а также разницы температур их кипения. Как видно из табл. с уменьшением разности температур кипения ионола и алифатических спиртов, их разделение в процессе программирования температуры хроматографической колонки падает. При этом, как следует из рис.4, зависимость относительного объема удерживания алифатических спиртов от коэффициента селективности их разделения с ионолом является линейной.

Таблица 2
Коэффициенты селективности разделения ионола и алифатических спиртов (k_c) и разницы температур их кипения ($\Delta T, ^\circ C$).

Нпп	Компоненты	K_c	$\Delta T, ^\circ C$
1	Ионол - Метанол	1,64	200,3
2	Ионол - Пропанол - 2	1,39	182,4
3	Ионол - Этанол	1,34	186,6
4	Ионол - Пропанол - 1	1,32	168,0
5	Ионол - Бутанол - 2	1,14	157,0
6	Ионол - Бутанол - 1	0,89	147,0
7	Ионол - Аминол - 2	0,79	133,0

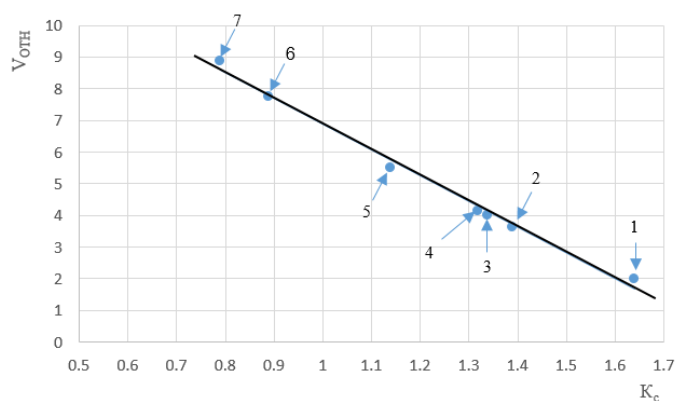


Рис. 4. Зависимость относительного удерживаемого объема алифатических спиртов $V_{отн}$ от коэффициента селективности разделения K_c : 1. Ионол – Метанол; 2. Ионол – Пропанол-2 – 1; 3. Ионол – Этанол; 4. Ионол – Пропанол – 1; 5. Ионол - Бутанол – 2; 6. Ионол - Бутанол – 1; 7. Ионол - Аминол – 2

На рис. 5 приведена зависимость логарифма времени удерживания алифатических спиртов от их температуры кипения. Это зависимость имеет линейный вид для высококипящих алифатических спиртов. Для низких членов гомологического ряда (метанол, этанол, изо-пропанол) наблюдается аномальное поведение. При этом при температуре 100⁰ алифатические спирты на исследуемой капиллярной колонке практически не разделяются. По-видимому, это связано с тем, что при высокой температуре (100⁰С) процесс разделения низкокипящих спиртов в хроматографической колонке протекает в парообразном состоянии и их разделение происходит по дисперсионному механизму. Очевидно, это связано с тем, что способность к образованию межмолекулярной водородной связи в системе сорбат-сорбент с повышением температуры падает, что приводит к снижению гидроксильной селективности разделения алифатических спиртов, обладающих протонодонорной способностью, и антиокислительной присадки.

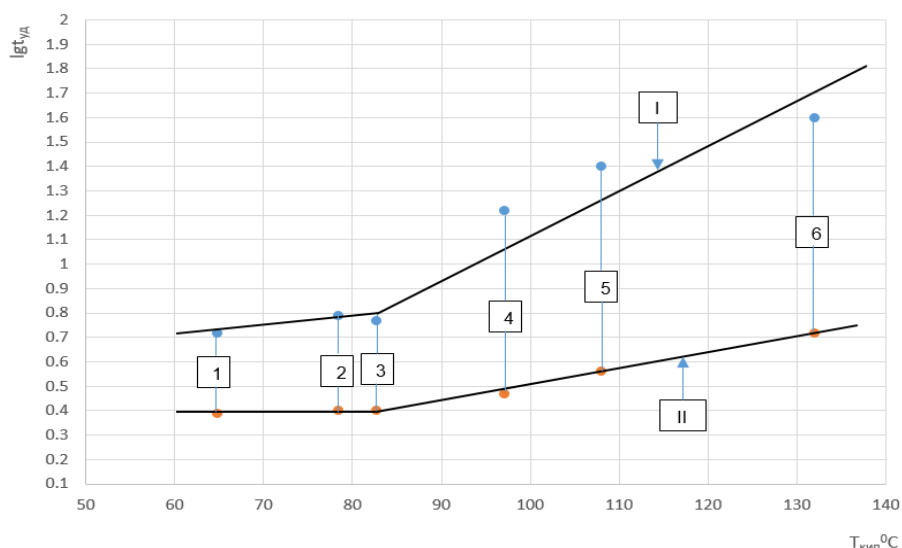


Рис. 5. Зависимость логарифма времени удерживания алифатических спиртов от их температуры кипения. Температура хроматографической колонки 40⁰С – I и 100⁰С – II. 1. Метанол; 2. Этанол 3. Пропанол -2; 4. Пропанол -1; 5. Бутанол -2; 6. Аминол – 2

Заключение

Таким образом, на основе проведенных экспериментальных исследований, для определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле перспективным является использование бутанола в качестве органического экстрагента.

Литература

- Петрова В.В. Типы присадок для трансформаторного масла // European Science. 2018. №6 (38). С.10-13.
- Sarathi R., Yadav K.S., Swarna V. Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. N 5. pp. 2513-2521.
- Zukowski P., Koltunowicz T., Kierczynski K., Subocz J., Szrot M., Gutten M., Sebok M., Jurcik J. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. N 4. pp. 2156-2164.
- Thirugnanam R., Siluvairaj M., Radha K. Retreatment of aged mineral oil using semiconductive nanocomposites for power transformer application // Int. Trans. Elect.r Energ. Syst. 2017. V.27. I.9. e2358.
- Hasan M.I. Improving the cooling performance of electrical distribution transformer using transformer oil. Based MEPCM suspension // Eng. Sci. and Tech.,an Int. J. 2017. V. 20. pp. 502-510.
- Badaruddin Y. Gunardi F., Firdianto A. Analysis on the quality of three-phase transformer oil // International Research Journal of Computer Science (IRJCS). 2017. V. 4. I.1. pp.1-7.
- Андреев Л.Н., Павлова П.П., Пинигин С.А. Изучение расхождение ионола в трансформаторном масле // Современная техника и технология. 2017. №3 (67). С.6-10.
- Davydov V.G., Zielinski. T., McPherson. L. Factory and Field Experience with Monitoring of vegetable oil Transformer // Proc. of 45th CJGRE Session, Paris. 2014. pp A2-301.
- Kumar K.K., Rajesh S.L. Biofuel Production Using Butanol and Used Transformer Oil // Int. Res. J.l of Eng. and Techn. (IRJET). 2016. V. 3. I.7. pp. 2162- 2168.

10. Saha T.K., Purkait P. Transformer Insulation Materials and Ageing. / Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques. 2017. 33p. <https://doi.org/10.1002/9781119239970.ch1>
11. Waghmare H. Transformer oil analyses. 2019. 12p. https://www.academia.edu/6518091/Transformer_Oil_Analysis (electronic resource).
12. Razzaq A., Zainuddin H., Hanaffi F., et al. Measurement of ester-based transformer oil aging using tapered single mode-multimode-single mode fiber structure // Microwave and Optical Technology Letters. 2019. V. 62. I.2. pp.559-564.
13. Новиков В.Ф. Диагностика маслonaполненного электрооборудования хроматографическими методами // Новые технологии, материалы и оборудование в энергетике. Монография в трех томах. Под ред. Э.Ю. Абдуллазянова, Э.В. Шамсутдинова. Качество энергоснабжения, энергоэффективности и экология. Казань, 2018. Т.3. С.139 -160.
14. Новиков В.Ф., Картасова А.А., Танеева А.В. Инструментальные методы анализа. В трех частях. Ч.3. Газохроматографический контроль производственных процессов в энергетике: Монография. Под редакцией профессора В.Ф. Новикова. Казань: Казан. гос. энерг. ун -т. 2018. 328с.
15. Zaitseva E.A., Dolgonos A.M. Three-Parameters model of intermolecular interactions as a basis for classification and selection of fixed phases for gas chromatography // Sorption and chromatographic processes. 2019. V.19. N5. pp.-525-541.
16. Кнох J.H., McLaren L. Anal. Chem. 1963. V. 35. 449p.
17. Супина В. Насадочные колонки для газовой хроматографии. Мир. 1977. 256с.

Авторы публикации

Нгуен Зуи Хынг – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Снигирева Юлия Вячеславовна – зав. учебной лабораторией, аспирант, кафедра «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет.

Танеева Алина Вячеславовна – канд. хим. наук, доцент, кафедра «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ), Казанский государственный энергетический университет.

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

References

1. Petrova VV. Types of additives for transformer oil. *European Science*. 2018;6(38):10-13.
2. Sarathi R, Yadav K, Swarna V. *Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015;22(5):2513-2521.
3. Zukowski P, Koltunowicz T, Kierczynski K, et al. *An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015;22(4):2156-2164.
4. Thirugnanam R, Siluvairaj M, Radha K. Retreatment of aged mineral oil using semiconductive nanocomposites for power transformer application. *Int. Trans. Elect.r Energ. Syst.* 2017;27(9):2358. <https://doi.org/10.1002/etep.2358>.
5. Hasan MI. Improving the cooling performance of electrical distribution transformer using transformer oil – Based MEPCM suspension. *Eng. Sci. and Tech., an Int. J.* 2017;20:502-510.
6. Badaruddin Y, Gunardi F.A, Firdianto. Analysis on the quality of three-phase transformer oil. *International Research Journal of Computer Science (IRJCS)*. 2017;4(1):1-7.
7. Andreev LN, Pavlova PP, Pinigin SA. The Study of the expenditure of ionol in transformer oil. *Modern equipment and technology*. 2017;3 (67):6-10.
8. Davydov VG, Zielinski T, McPherson L. *Factory and Field Experience with Monitoring of vegetable oil Transformer*. Proc. of 45th CJGRE Session, Raris. 2014.
9. Kumar KK, Rajesh SL. Biofuel Production Using Butanol and Used Transformer Oil. *Int. Res. J.I of Eng. and Techn. (IRJET)*. 2016;3(7):2162- 2168.
10. Saha TK, Purkait P. Transformer Insulation Materials and Ageing. *Transformer Ageing: Monitoring and Estimation Techniques*. 2017. 33p. <https://doi.org/10.1002/9781119239970.ch1>

11. Waghmare H. Transformer oil analyses. 2019. 12p. https://www.academia.edu/6518091/Transformer_Oil_Analysis(electronic resource).
12. Razzaq A, Zainuddin H, Hanaffi F, et al. A Measurement of ester-based transformer oil aging using tapered single mode-multimode-single mode fiber structure. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2019;62(2):559-564.
13. Novikov VF. Diagnostika maslonapolnennogo elektrooborudovaniya khromatograficheskimi metodami. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie v energetike. Monografiya*. ... Pod red. E. YU. Abdullazyanova, EV. Shamsutdinova. Kachestvo energosnabzheniya, energoeffektivnosti i ekologiya. Kazan. 2018;3:139-160.
14. Novikov VF, Kartashova AA, Taneeva AV. Instrumental'nye metody analiza. V trekh chastyakh. *Gazokhromatograficheskii kontrol' proizvodstvennykh protsessov v energetike: Monografiya*. ... Kazan: Kazan. gos. energ. Un-t. 2018. 328p.
15. Zaitseva EA, Dolgonos AM. Three-Parameters model of intermolecular interactions as a basis for classification and selection of fixed phases for gas chromatography. *Sorption and chromatographic processes*. 2019;19(5):525-541.
16. Knox JH, McLaren L. *Anal. Chem.* 1963;35:449p.
17. Supina V. Packing columns for gas chromatography. Mir. 1977. 256p.

Authors of the publication

Duy H. Nguyen – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Julia V. Snigireva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alina V. Taneeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

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

Получено

21 ноября 2020г.

Отредактировано

10 декабря 2020г.

Принято

14 декабря 2020г.