

ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ТОНКОСЛОЙНОЙ И КОЛОНОЧНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

Ву Нгок Зан, В.Ф. Новиков

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

Резюме: Большое внимание уделяется рассмотрению причин старения трансформаторного масла под влиянием техногенных и природных факторов. Рассмотрен механизм деструкции бумажной изоляции, в результате которой образуются фурановые соединения, которые попадают в трансформаторное масло и ухудшают его диэлектрические характеристики. Приведены характеристики отечественного трансформаторного масла марки ГК-1, получаемого с использованием технологии гидрокрекинга в среде водорода. В отработанном трансформаторном масле образуются фурановые соединения, которые контролируются с использованием хроматографических методов анализа по стандартам методикам.

Был определен групповой состав трансформаторного масла с использованием тонкослойной хроматографии. В качестве растворителя использовали н-Гексан. Для извлечения из трансформаторного масла фурановых соединений используются различные органические растворители, физико-химические свойства которых приведены в настоящей работе. Установлено, что время удерживания исследуемых сорбатов соответствует повышению температур их кипения для этилацетата, метилэтилкетона и додекана. В случае изопропанола, который имеет близкую температуру кипения с этилацетатом и метилэтилкетонам наблюдается существенное повышение времени удерживания, что связывается с образованием межмолекулярной водородной связи. Установлена зависимость диаметра пятна фурановых веществ от их концентрации в условиях тонкослойной хроматографии на пластиках «Sorbfil». При этом наиболее эффективное разделение характерно для фурфурола. В этом случае хроматографические пятна имеют малые размеры с хорошей четкостью воспроизведения.

Методом колоночной жидкостной хроматографии в восходящем режиме определена зависимость времени удерживания стандартных сорбатов от длины сорбционного слоя Силохром С-80, которая является параболической. Установлено, что наиболее высокие значения времени удерживания характерны для этоксиэтанола и изопропанола, что согласуется с известными теоретическими положениями жидкостной хроматографии.

Приведены гистограммы влияния времени удерживания стандартных сорбатов от их природы и температуры кипения, где изопропанол и 2-Этоксизтанол имеют экстремальные значения. При этом изопропанол, имеющий более низкую температуру кипения чем 2-Этоксизтанол удерживается на сорбенте сильнее, что связывается с образованием межмолекулярных водородных связей с поверхностными силанольными группами сорбента.

Ключение слова: трансформаторное масло, сорбент, сорбат, хроматография, растворитель, свойства, время удерживания.

Для цитирования: Ву Нгок Зан, В.Ф. Новиков. Изучение сорбционных свойств органических растворителей в условиях тонкослойной и колоночной хроматографии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 19-26. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-19-26.

STUDY OF THE SORPTION PROPERTIES OF SOLVENTS IN THIN-LAYER AND COLUMN CHROMATOGRAPHY

Vu Ngoc Dan, BF. Novikov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vndan@cnd.edu.vn

Abstract: Much attention is paid to the consideration of the causes of transformer oil aging under the influence of technogenic and natural factors. The paper insulation destruction mechanism is considered, as a result of which furan compounds are formed that enter the transformer oil and worsen its dielectric characteristics. The characteristics of the domestic transformer oil grade GK-1 obtained using the technology of hydrocracking in a hydrogen medium are given. Furan compounds are formed in used transformer oil, which are monitored using chromatographic analysis methods according to standard procedures.

The group composition of transformer oil was determined using thin layer chromatography. As a solvent used n. Hexane. To extract furan compounds from transformer oil, various organic solvents are used, the physicochemical properties of which are given in this work. It was found that the retention time of the studied sorbates corresponds to an increase in their boiling points for ethyl acetate, methyl ethyl ketone and dodecane. In the case of isopropanol, which has a close boiling point with ethyl acetate and methyl ethyl ketone, a significant increase in retention time is observed, which is associated with the formation of an intermolecular hydrogen bond. The dependence of the spot diameter of furan substances on their concentration was established under conditions of thin-layer chromatography on Sorbfil plastics. Moreover, the most effective separation is characteristic of furfural. In this case, the chromatographic spots are small in size with good fidelity.

The ascending mode of column liquid chromatography was used to determine the dependence of the retention time of standard sorbates on the length of the Silyochrome S-80 sorption layer, which is parabolic. It was found that the highest retention times are characteristic of ethoxyethanol and isopropanol, which is consistent with the known theoretical principles of liquid chromatography.

Histograms of the effect of the retention time of standard sorbates on their nature and boiling point, where isopropanol and 2-ethoxyethanol are extreme, are presented. In this case, isopropanol having a lower boiling point than 2-Ethoxyethanol is retained on the sorbent more strongly, which is associated with the formation of intermolecular hydrogen bonds with surface silanol groups of the sorbent.

Key words: transformer oil, sorbent, sorbate, chromatography, solvent, properties, retention time.

For citation: Vu Ngoc Dan, BF. Novikov. Study of the sorption properties of solvents in thin-layer and column chromatography. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020; 22(2):19-26. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-19-26.

Введение и литературный обзор

Как известно силовые трансформаторы эксплуатируются в среде трансформаторного масла, которое является диэлектриком и выполняет функции охлаждающей среды. Современная диагностика трансформаторного электрооборудования основана на своевременном контроле технического состояния трансформаторного масла различными инструментальными методами. При этом определяют развитие таких дефектов трансформаторного электрооборудования как локальные перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции силовых трансформаторов, электрические разряды в изоляционном масле, искрообразование в контактных соединениях, увлажнение изоляции и её загрязнение, попадание воздуха в систему и степень полимеризации бумажно-масляной изоляции и др. [1-4].

Кроме трансформаторного масла в силовом маслонаполненном электрооборудовании в качестве диэлектрика используется бумажная изоляция, которая под влиянием эксплуатационных факторов и окружающей природной среды подвергается деструкции в результате протекания процессов гидролитического и термоокислительного превращения целлюлозы. В результате этого процесса образуются фурановые соединения, которые растворяются в трансформаторном масле и ухудшают его диэлектрические характеристики

[5-7]. Происходит старение трансформаторного масла в результате чего повышается его кислотность, происходит ухудшение электроизоляционных свойств, образуются твёрдые осадки к которым относятся асфальтены, карбены, карбоны, оксикислоты и др. Эти вещества концентрируются на обмотках трансформаторного электрооборудования и затрудняют отвод тепла от технологических деталей силовых трансформаторов.

Твёрдые осадки в трансформаторном масле бывают омыляемые и асфальтовые. Омыляемые осадки растворяются в горячем масле, а при его охлаждении выпадают в осадок. При этом эти осадки реагируют с окислами металлов с образованием соответствующих солей. Асфальтовые осадки являются нейтральными продуктами окисления и полимеризации. Они плохо растворяются в трансформаторном масле, выпадают в осадок и концентрируются на обмотках трансформаторного электрооборудования. В отработанном трансформаторном масле наблюдается появление свободных органических кислот, которые хорошо растворяются в нем [8-10]. При этом в трансформаторном масле образуются термодинамические более устойчивые соединения, что позволяет определять их концентрацию различными инструментальными методами [11-12].

Наиболее распространенное отечественное трансформаторное масло марки ГК-1 производится с использованием технологии гидрокрекинга нефтяного дистиллята под высоким давлением и в среде водорода. В результате этого процесса происходит деструкция нефтяного дистиллята, и образуются парафиновые углеводороды, концентрация которых составляет от 10 до 15%, нафтеновые и циклопарафиновые углеводороды от 60 до 70%, ароматические углеводороды от 15 до 20% и асфальто-смолистые вещества от 1 до 2%. В качестве примесей в трансформаторном масле ГК-1 присутствуют сернистые и азотистые соединения, а также нафтеновые кислоты.

Материалы и методы

Для определения содержания фурановых соединений в трансформаторном масле используются различные варианты хроматографических методов к числу которых относится газо-жидкостная хроматография с использованием насадочных или капиллярных хроматографических колонок [13-14], высокоэффективная жидкость-жидкостная хроматография [15-16], а также тонкослойная хроматография, характеризующаяся простотой выполнения эксперимента, экспрессностью и наглядностью получаемых результатов [17-19]. При этом во всех видах хроматографических методов анализа фурановых производных используются органические растворители, с помощью которых экстрагируются целевые компоненты из трансформаторного масла, а также они используются в качестве стандартных сорбатов при реализации процесса хроматографического разделения индивидуальных компонентов. При этом селективность экстракции и хроматографического разделения зависит от физико-химических свойств используемых сорбатов и определяется их природой.

В настоящей работе были изучены сорбционные свойства индивидуальных органических растворителей (стандартных сорбатов), которые широко используются в технологии извлечения фурановых соединений из трансформаторного масла, а также в качестве селективных сорбатов в тонкослойной и колоночной жидкостной хроматографии.

Экспериментальная часть работы проводилась с использованием тонкослойных пластинок «*Sorbfil*» с флуоресцентным индикатором, позволяющим определять анализируемые компоненты в ультрафиолетовом свете. Использовали также вариант жидкостной колоночной хроматографии в восходящем режиме, когда органический растворитель (сорбат) из вials по капиллярам сорбента, в качестве которого использовали силихром С-80, поднимался по длине сорбционного слоя. Определяли время подъема растворителей (время удерживания) через каждые 10 мм.

Результаты и обсуждения

Предварительно методом радиальной тонкослойной хроматографии на пластинках «*Sorbfil*» определяли групповой состав трансформаторного масла марки ГК-1. С этой целью в центральную область тонкослойной пластинки размером 100x100 мм наносили 1 мкл отработанного трансформаторного масла и затем микро шприцом подавали в эту область сорбат, в качестве которого использовали н-Гексан, являющийся неполярным. В результате этого процесса получили радиальную хроматограмму разделения отработанного трансформаторного масла на ряд зон, соответствующим продуктам деструкции. Для свежего трансформаторного масла таких зон не было обнаружено. Таким образом, на качественном уровне можно провести предварительную оценку трансформаторного масла визуально по виду хроматограммы (рис. 1).

Для извлечения из трансформаторного масла фурановых производных используются органические растворители различной природы. Наиболее часто применяют н-Гексан с добавками ацетонитрила, который относится к прекурсорам, обладает высокой токсичностью для организма человека и поэтому его применение стараются ограничить путём замены менее токсичными сорбатами.

В табл.1 приведены физико-химические свойства стандартных сорбатов используемых в настоящей работе в качестве элюентов для тонкослойной и жидкостной колоночной хроматографии в восходящем режиме.

Как видно из табл. 1 в основном время удерживания сорбатов соответствует повышению температур их кипения для этилацетата, метилэтилкетона ин. Додекана. Для изопропанола, который имеет близкую температуру кипения с этилацетатом и метилэтилкетонем наблюдается существенное увеличение времени удерживание, что очевидно связано с образованием межмолекулярной водородной связи спирта с поверхностью тонкослойной пластинки с силикагелем.

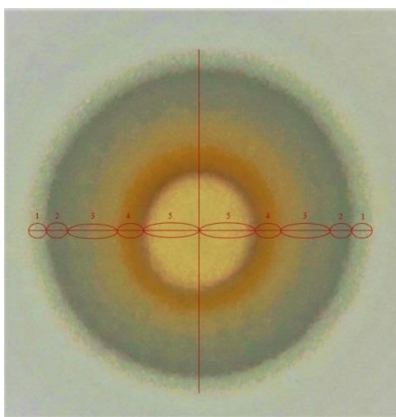


Рис. 1. Радialная хроматограмма отработанного трансформаторного масла марки ГК-1

Сорбат – н-Гексан, его количество, подаваемого в центр тонкослойной пластинки, «Sorbfil» составляет 20 мкл. Сорбат подавали порциями пять раз по 4 мкл. Концентрация колец: 1 – 3,58%; 2 – 9,26%; 3 – 69,85%; 4 – 14,43%, 5 – 2,89%. Площади колец: 1 – 5см²; 2 – 8см²; 3 – 22см²; 4 – 10см²; 5 – 20см²; Нафтены и Циклоалканы: 69,85%. Ароматические углеводороды: 14,43%. Смолисто-асфальтеновые вещества: 2,89%.

Физико – химические свойства стандартных сорбатов: $T_{\text{кип.}}^{\circ}\text{C}$ – температура кипения; μ_{20} – дипольный момент; ε_{20} – диэлектрическая постоянная; n_{D20} – показатель преломления; d_u^{20} – плотность; мПа_a – вязкость; t_{10} – время удерживания сорбата по длине сорбционного слоя в 10 см Силохроми С-80.

Таблица 1

№	Сорбат	$T_{\text{кип.}}^{\circ}\text{C}$	μ_{20}	ε_{20}	n_{D20}	d_u^{20} г/см ³	мПа_a , 20°С	t_{10} , мин
1	Ацетон	56,0	2,70	21,4	1,36	0,79	0,32	8,1
2	н-Гексан	68,0	0,05	1,90	1,42	0,66	0,32	8,8
3	Этилацетат	77,1	2,48	6,00	1,37	0,90	0,45	10,3
4	Метилэтилкетон	79,6	2,84	19,00	1,38	0,80	0,30	15,5
5	изо-Пропанол	82,6	1,78	18,00	1,38	0,78	1,38	58,0
6	изо-Бутанол	108,0	1,79	18,50	1,40	0,80	3,95	65,4
7	н-Бутанол	117,4	1,62	7,80	1,39	0,81	33,80	61,8
8	2-Этоксизтанол	135,6	-	-	1,41	0,93	-	43,7
9	н-Додекан	216,2	0	2,00	1,42	0,75	1,38	18,4

Как известно тонкослойные пластинки «Sorbfil» состоят из алюминиевой или лавсановой подложки, на которую нанесён слой силикагеля, который представляет собой высушенный гель ангидрида кремниевой кислоты SiO₂. Силикагель характеризуется высокой сорбционной ёмкостью с удельной поверхностью от 30 до 600 м²/г с диаметром пор от 0,01 до 0,02 мкм. Поверхность силикагеля покрыта гидроксильными группами, способными вступать в межмолекулярные взаимодействия анализируемыми сорбатами. Для определения эффективности разделения фурановых производных были приготовлены их стандартные растворы различной концентрации в н-Гексане и методом восходящей

тонкослойной хроматографии определен диаметр их пятен при постоянном объёме дозируемой пробы в 1 мкл.

На рис. 2 приведена зависимость диаметра пятен фурановых веществ от их концентрации, которая в исследуемой области является линейной. При этом наиболее эффективное разделение характерно для фурфурола, так как хроматографические пятна имеют малые размеры с хорошей четкостью воспроизведения.

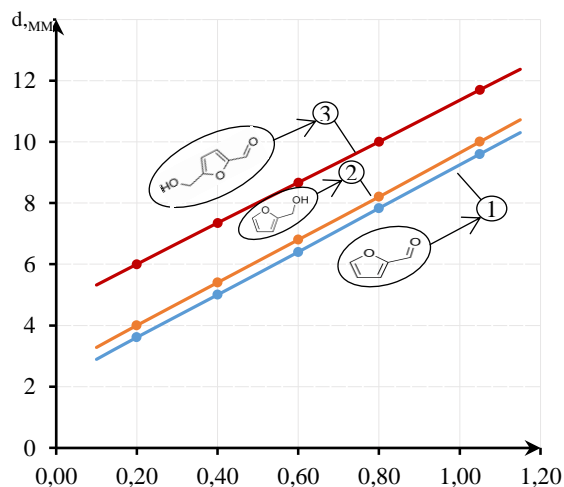


Рис. 2. Зависимость диаметра пятна фурановых веществ от их концентрации для тонкослойной пластинки «Sorbfil» 1 – Фурфурол; 2 – Фурфуриловый спирт; 3 – Оксиметилфурфурол

Атомы водорода гидроксильной группы спирта взаимодействуют с кислородом SiO_2 поверхности силикагеля, что приводит к возрастанию их времени удерживания. Аналогичная картина характерна для 2-Этоксизэтанола, но в данном случае время удерживания меньше чем у изопропанола за счёт стерических затруднений при образовании межмолекулярной водородной связи. Время удерживания алифатических спиртов повышается за счет связывания атома водорода гидроксильной группы спирта с не поделённой электронной парой атома кислорода, OH группы с SiO_2 силикагеля.

На рис. 3 приведена зависимость времени удерживания стандартных сорбатов от длины сорбционного слоя Силохрома С-80 ($\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$), который широко применяется в газовой хроматографии в качестве селективного сорбента. Указанная зависимость получена методом жидкостной колоночной хроматографии в восходящем режиме.

Как видно из рис.2 характер приведенной зависимости является параболическим. Это связано с тем, что равновесие в системе жидкость – твёрдое тело наступает постепенно. Для всех исследуемых сорбатов кривые имеют близкий угол наклона в начальном участке хроматографической системы. При этом наиболее высокие значения времени удерживания являются характерным для 2-Этоксизэтанола и изопропанола, что согласуется с известными положениями жидкостной хроматографии.

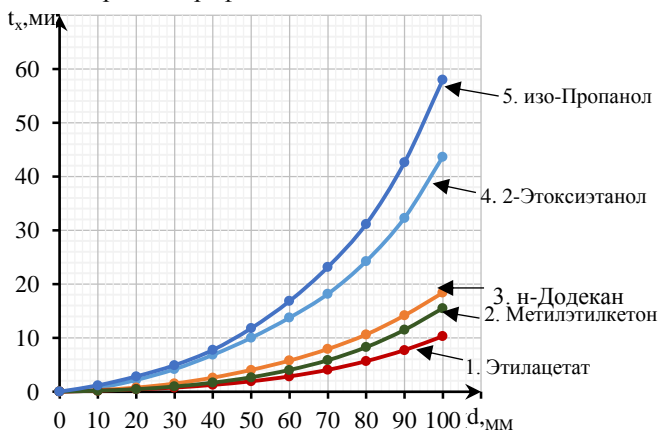


Рис. 3. Зависимость времени удерживание стандартных сорбатов от длины сорбционного слоя силохрома С-80 ($\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$)

Стандартные сорбаты: 1 – Этилацетат; 2 – Метилэтилкетон;
4 – 2-Этоксизэтанол; 5 – изо-Пропанол

3 – н-Додекан;

На рис. 4 приведена гистограмма влияния времени удерживания стандартных сорбатов от их природы и температуры кипения. Также как и в предыдущем случае наиболее высокое время удерживания характерно для этоксиэтанола и изопропанола.

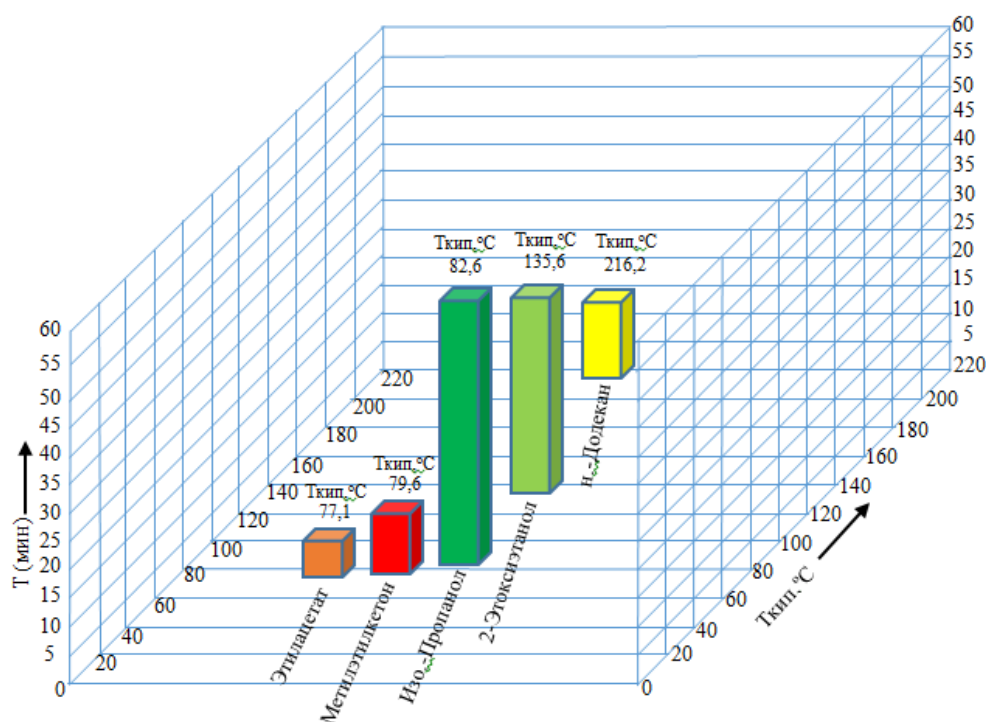


Рис. 4. Гистограмма влияния времени удерживания стандартных сорбатов от их природы и температуры кипения

Таким образом, для контроля содержания фурановых соединений в трансформаторном масле, хроматографическими методами, перспективным является, использование изо-Пропилового спирта, который в условиях жидкостной колоночной хроматографии характеризуется более высоким временем удерживания по отношению к различным, по физико-химическим свойствам, сорбатов. Для оценки степени деградации трансформаторного масла, перспективным является использование метода радиальной тонкослойной хроматографии, который характеризуется экспрессностью анализа и наглядностью получаемых результатов. Полученные экспериментальные данные можно использовать в системе диагностики маслонаполненного электрооборудования хроматографическими методами.

Литература

1. Козлов В.К., Садитов А.Х. Степень полимеризации бумажной изоляции силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т 20. № 9-10. С. 34-38.
2. Новиков В.Ф. Диагностика маслонаполненного электрооборудования хроматографическими методами // В кн. Новые технологии, материала и оборудования. В 3т. / Под общ. Ред. Абдуллазянова Э.Ю., Шамсутдинова Э.В. Казанский государственный энергетический университет. 2018. Т. 3. С. 138-160.
3. Козлов В.К., Сабитов А.Х., Низамутдинов Б.Р. Исследование процесса старения бумажно-масляной изоляции в видимом диапазоне // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 3-4. С. 81-85.
4. Kurakina O.E., Kozlov V.K., Turanova O.A., et al. Research of the Changes in the Structural Group Composition of Transformer Oil During Operation // Problemele energeticii regionale. 2018. N 2. (37).pp. 39-45.
5. Новиков В.Ф., Карташова А.А., Танеева А.В. Инструментальные методы анализа. В трех частях. Ч.III. Газохроматографический контроль производственных процессов в энергетике: Монография. Казань: Казанский государственный энергетический университет. 2018. 328с.
6. Mackenzie E., Crossey J., De Pablo A., et al. On-line monitoring and diagnostics for power transformers // IEEE International symposium on electrical insulation conference. 2010. pp. 1-5.

7. Ding H., Heywood R., Lapworth G., et al. Learning from success and failure in transformer fault gas analysis and interpretation // International conference on reliability of transmission and distribution networks. 2011. pp. 1-6.
8. Krause Ch., Piovan U., Tschudi D. Building reliable AC and DC UHV power transformers dielectric design principles, suitable pressboard insulation and issues related to HVDC testing// Proceeding of international conference on UHV transmission.- Beijing, China. 2009. P. 28-34.
9. Baird P., Herman H., Stevens G. Spectroscopic measurement and analysis of water and oil intratransformer insulating paper// IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. 2006. V. 13. P. 293-308.
10. 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. V. 22. N 4. pp. 2156-2164.
11. Sarathi R., Yadav K.S., Swarna M. 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. N5. pp. 2513-2521.
12. Bo Qi, Xiaolin Zhao, Chengrong Li, et al. Transient electric field characteristics in oil-pressboard composite insulation under voltage polarity reversal // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. V. 22. N4. pp. 2148-2155.
13. 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.
14. РД 34.43.206-94. Методика количественного химического анализа. Определение содержания производных фурана в электроизоляционных маслах методом жидкостной хроматографии. М.: ОРГЭС. 1995. 12с.
15. РД 34.43.208-95. Методика количественного химического анализа. Определение содержания присадок в энергетических маслах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. М.: ОРГЭС. 1995. 12с.
16. Львов Ю.Н., Писарева Н.А., Сапожников Ю.М. Применение тонкослойной хроматографии при определении микроколичеств фурановых производных в изоляционном масле электрооборудования // Электрические станции. 1993. № 8. С. 48-51.
17. Карташова А.А. Новиков В.Ф. Тонкослойная хроматография как метод контроля фурановых соединений в трансформаторном масле // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 1-2. С. 138-145.
18. Танеева А.В., Зиятдинова Р.В., Стойков И.И., др. Влияние природы растворителей на сорбционные свойства тонкослойных пластинок «*Sorbfil*», модифицированных наночастицами тиакаликс[4]арен/SiO₂. Сорбционные и хроматографические процессы. 2018. Т. 18. № 6. С. 865-871.

Авторы публикации

Ву Нзюк Зан – аспирант, Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ).

Новиков Вячеслав Федорович – д-р хим. наук, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Kozlov VK, Saditov AKh. Stepen' polimerizatsii bumazhnoi izolyatsii silovykh transformatorov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2018;20(9-10):34-38.
2. Novikov VF. Diagnostika maslonapolnennogo elektrooborudovaniya khromatograficheskimi metodami. *Novye tekhnologii, materiala i oborudovaniya*. ed. Abdullazyanov E.Yu., Shamsutdinov E.V. Kazan State Power Engineering University, Russia. 2018;3:138-160.
3. Kozlov V.K., Sabitov A.Kh., Nizamutdinov B.R. Issledovanie protsessa stareniya bumazhno-maslyanoi izolyatsii v vidimom diapazone. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2015;3-4:81-85.
4. Kurakina OE, Kozlov V.K., Turanova O.A., et al. Research of the Changes in the Structural Group Composition of Transformer Oil During Operation. *Problemele energeticii regionale*. 2018;2(37):39-45.
5. Novikov VF, Kartashova AA, Taneeva A.V. Instrumental'nye metody analiza. Ch.3. *Gazokhromatograficheskii kontrol' proizvodstvennykh protsessov v energetike: Monografiya*. Kazan State Power Engineering University 2018. 328 p.
6. Mackenzie E, Crossey J, De Pablo A, et al. On-line monitoring and diagnostics for power transformer. *IEEE International symposium on electrical insulation conference*. 2010. pp. 1-5.

7. Ding H, Heywood R, Lapworth G, et al. Learning from success and failure in transformer fault gas analysis and interpretation. *International conference on reliability of transmission and distribution networks*. 2011. pp. 1-6.
8. Krause Ch, Piovan U, Tschudi D. Building reliable AC and DC UHV power transformers dielectric design principles, suitable pressboard insulation and issues related to HVDC testing. *Proceeding of international conference on UHV transmission*. Beijing, China. 2009. pp. 28-34.
9. Baird P, Herman H, Stevens G. Spectroscopic measurement and analysis of water and oil in transformer insulating paper. *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*. 2006;13:293-308.
10. 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.
11. Sarathi R, Yadav KS, Swarna M. 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.
12. Bo Qi, Xiaolin Zhao, Chengrong Li, Hao Wu. Transient electric field characteristics in oil-pressboard composite insulation under voltage polarity reversal. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015;22(4):2148-2155.
13. 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. RD 34.43.206-94. Metodika kolichestvennogo khimicheskogo analiza. *Opredelenie sodержaniya proizvodnykh furana v elektroizolyatsionnykh maslakh metodom zhidkostnoi khromatografii*. M.: ORGRES. 1995. 12 p.
16. RD 34.43.208-95. Metodika kolichestvennogo khimicheskogo analiza. *Opredelenie sodержaniya prisadok v energeticheskikh maslakh metodom vysokoeffektivnoi zhidkostnoi khromatografii*. M.: ORGES. 1995. 12 p.
17. L'vov Yu.N, Pisareva NA, Sapozhnikov YuM. Primenenie tonkosloinoi khromatografii pri opredelenii mikrokolichestv furanovykh proizvodnykh v izolyatsionnom masle elektrooborudovaniya. *Elektricheskie stantsii*. 1993;8:48-51.
18. Kartashova AA, Novikov VF. Tonkosloinaya khromatografiya kak metod kontrolya furanovykh soedinenii v transformatornom masle. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2016;1-2:138-145.
19. Taneeva AV, Ziatdinova RV, Stoikov I, et al. Vliyanie prirody rastvoritelei na sorbtionnye svoistva tonkosloinykh plastinok «Sorbfil», modifi- tsirovannykh nanochastitsami tiakaliks[4]aren/SiO₂. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2018. T. 18. № 6. S. 865-871.

Authors of the publication

Vu Ngoc Dan – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: vndan@cnd.edu.vn.

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

Поступила в редакцию

17.04.2020 г.