

## ВЛИЯНИЕ СЕРАОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ НА ГИГРОСКОПИЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА И ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Л.Р. Гайнуллина, В.П. Тутубалина

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
gainullina7819@mail.ru

**Резюме:** С применением модельных смесей изучена зависимость растворения воды в масляной фракции от температуры и количества сераорганических соединений. Установлено, что повышенные концентрации сераорганических соединений в модельных смесях, в сочетании с действием высоких температур и напряженности электрического поля, способствуют повышению растворимости воды в них. Проведенные экспериментальные исследования также показали, что повышение концентрации сераорганических соединений и гигроскопичности масла в условиях его эксплуатации в силовых трансформаторах сопровождается ростом диэлектрических потерь и снижением электрической прочности масла.

**Ключевые слова:** трансформаторное масло, сераорганические соединения, электрические характеристики, гигроскопичность, тангенс угла диэлектрических потерь, электрическая прочность, модельные смеси.

## INFLUENCE OF ORGANOSULFUR CONNECTIONS ON HYGROSCOPICITY OF TRANSFORMER OIL AND ITS ELECTRIC CHARACTERISTICS

L. R. Gaynullina, V. P. Tutubalina

Kazan state power energy university, Kazan, Russia  
gainullina7819@mail.ru

**Abstract:** The dependency of dissolution of water in oil fraction from temperature and the number of organosulfur compounds on the usage of model mixtures was studied. It is found, that the increase of concentration of organosulfur compounds in model mixtures with high temperatures and electric field strength promotes the growth of water solubility in them. Experimental researches have also shown that increase in concentration of organosulfur compounds and hygroscopicity of oil in conditions of his operation in power transformers is followed by growth of dielectric losses and decrease in electrical durability of oil.

**Keywords:** transformer oil, organosulfur compounds, electrical characteristics, hygroscopicity, tangent of an angle of dielectric losses, electrical durability, model mixtures.

### Введение

Надежность эксплуатации современных систем производства и распределения электрической энергии зависит от надежности работы электрооборудования. Вместе с тем в электрооборудовании трансформаторное масло относится к одним из важных элементов изоляционной конструкции. В этой связи главной задачей повышения надежности электрооборудования является увеличение срока службы трансформаторного масла, используемого в качестве теплоотводящей и изолирующей среды. Увеличение добычи и

переработки сернистых нефтей в России и во всем мире способствует росту концентрации сераорганических соединений в нефтепродуктах, получаемых из этих нефтей. Сераорганические соединения могут оказывать существенное влияние на растворимость воды в масле в процессе его транспортировки, залива в электрооборудование или хранения. К основным параметрам, определяющим свойства масла как диэлектрика, относятся электрическая прочность, проводимость и диэлектрические потери, в значительной степени зависящие от содержания воды в масле [1]. Вода в изоляции накапливается при небольшой нагруженности силового трансформатора или в результате длительного его отключения. В указанных случаях происходит поглощение воды из атмосферного воздуха [1]. Сухое масло при 20 °С может растворить до 0,005 % воды, а масло, находящееся в течении длительного времени в эксплуатации, в своем составе может содержать до 1,6 – 10,6 % воды, что снижает электрическую прочность жидкой изоляции и ускоряет его старение [1–3].

### **Экспериментальная часть**

Цель работы – изучение влияния концентрации сераорганических соединений и воды на электрические характеристики масляных фракций с  $T_{\text{кип}} = 300\text{--}400$  °С Ромашкинской нефти, являющейся сырьем для получения трансформаторного масла.

Для исследования растворимости воды в масляной фракции от количества сераорганических соединений были приготовлены модельные смеси с различным содержанием сераорганических соединений, выделенных из масляной фракции  $T_{\text{кип}} 300\text{--}400$  °С Ромашкинской нефти, содержащей в своем составе 1,68 % общей серы, в том числе 0,62 % сульфидной серы. Для разделения сераорганических соединений масляной фракции был использован адсорбционный метод, поскольку он позволяет осуществлять разделение сераорганических соединений в мягких условиях (температура 20–25 °С) при варьировании адсорбентов и элюентов, а также дает возможность одновременно и наиболее полно выделить все классы сераорганических соединений из масляных фракций [3–4].

Адсорбционное разделение сераорганических соединений проводили в лабораторном адсорбере высотой 1,2 м и диаметром 0,03 м при комнатной температуре (20°С). В качестве адсорбентов использовали активированный крупнопористый силикагель марки АСК и оксид алюминия. Элюентами служили петролейный эфир с  $T_{\text{кип}} 40\text{--}70$  °С и бензол. Адсорбционное разделение сераорганических соединений масляной фракции проводили по методике, описанной в литературе [3].

Модельные смеси были приготовлены на основе предварительно обессеренной масляной фракции с остаточным содержанием серы, равным 0,01 %. Концентрация сераорганических соединений в модельных смесях варьировалась в широком диапазоне от 1,0 до 3,0 % с шагом 0,5 %. Концентрацию воды в масляных фракциях определяли по методу Фишера (ГОСТ 7822-75). Содержание общей серы находили по ГОСТ 19121-73, пробивное напряжение и тангенс угла диэлектрических потерь в масляной фракции – по ГОСТ 6581-75.

Растворимость воды в модельных смесях в зависимости от концентрации сераорганических соединений изучали при температуре 95 °С в течение 44 часов в электрическом поле напряженностью 49 кВ/см.

### **Обсуждение результатов**

Экспериментальные данные растворимости воды в масляной фракции от концентрации общей серы показаны на рис. 1.

Анализ данных рис. 1 показывает, что с повышением концентрации общей серы в модельных смесях от 1 до 3 % происходит увеличение растворимости воды в смесях в 5 раз. Например, при концентрации общей серы в смеси, равной 0,01 % масс, растворяется 0,65 г воды на 1 т масляной фракции. Дальнейшее увеличение концентрации общей серы в модельных смесях до 1,5, 2,0, 2,5 и 3,0 % приводит к повышению растворимости воды, соответственно, в 7,7; 8,0; 16,0 и 23,5 раза по сравнению с первоначальным значением.

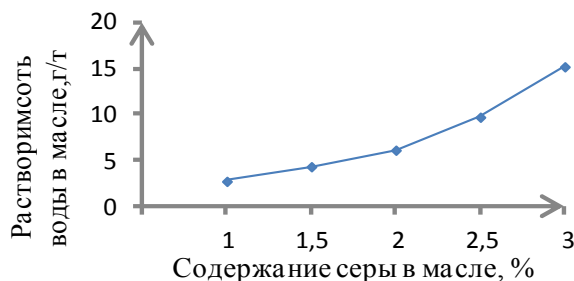


Рис. 1. Зависимость растворимости воды в модельных смесях от концентрации общей серы

Проведенное экспериментальное исследование показало, что сераорганические соединения, содержащиеся в масляных фракциях, способствуют увеличению растворимости воды в последних. Данное обстоятельство указывает на необходимость обессеривания масляных фракций при производстве трансформаторных масел для маслонаполненного электрооборудования энергосистем.

Следующая серия опытов была поставлена с целью исследования влияния концентрации сераорганических соединений и температурного фактора на растворимость воды в модельных смесях. Опыты по растворимости воды в модельных смесях проводили в температурном интервале 20–95 °С в течение 44 часов в электрическом поле напряженностью 49 кВ/см.

Результаты исследования в виде графических зависимостей приведены на рис. 2.

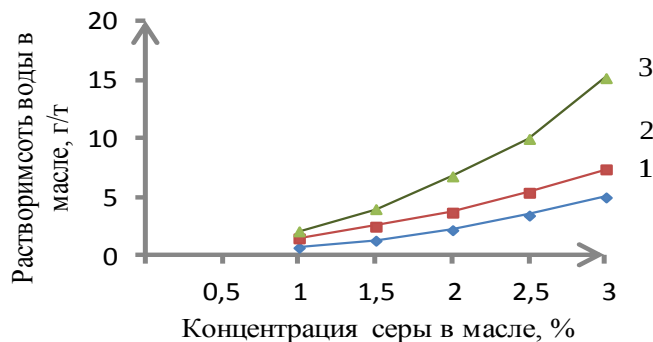


Рис. 2. Зависимость растворения воды в модельных смесях от концентрации сераорганических соединений и температуры:  
1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 95 °С

Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что при одновременном повышении температуры и концентрации сераорганических соединений в модельных смесях происходит рост растворимости воды в них. Так, например, в модельной смеси с содержанием общей серы, равном 1,0 %, с повышением температуры от 20 °С до 95 °С растворимость воды увеличилась в 1,5 раза. При концентрации сераорганических соединений в модельных смесях 2,0 и 3,0 % повышение температуры от 20 до 95 °С способствует росту растворимости воды в модельных смесях, соответственно, в 2 и 3,3 раза. Повышение концентрации общей серы в исследуемых смесях от 1,0 до 2,0 и 3,0 % сопровождается ростом растворимости воды при температуре 95 °С, соответственно, в 3,3 и 7,24 раза.

Проведенные исследования показали, что сераорганические соединения в заданных концентрациях от 1,0 до 3,0 % в модельных смесях повышают их гигроскопичность. Учитывая взаимную растворимость воды и углеводородов модельных смесей, вода в последних может находиться не только в виде истинного раствора, но и в виде эмульсий. Данное обстоятельство представляет интерес с точки зрения эксплуатации изоляционного масла в современном трансформаторном оборудовании в условиях высокой напряженности электрического поля и повышенных рабочих температур. В процессе эксплуатации масла в натуральных условиях при окислении углеводородов происходит образование воды, которая поглощается ароматическими структурами углеводородов и сераорганических соединений, а в дальнейшем, наряду с истинными растворами воды в трансформаторном масле при ее накоплении, могут образовываться стойкие эмульсионные смеси воды и масла, которые снижают его эксплуатационные характеристики, что недопустимо для обеспечения нормальной работы трансформаторов тепловых электрических станций [5–10].

Следующая серия опытов была проведена с целью исследования влияния количества воды в модельных смесях на диэлектрические потери. Опыты проводили при температуре 70 °С в течение 44 часов в электрическом поле напряженностью 49 кВ/см при изменении концентрации воды в смеси от 0,01 до 20 г/т фракции. Полученные экспериментальные данные показаны на рис. 3.

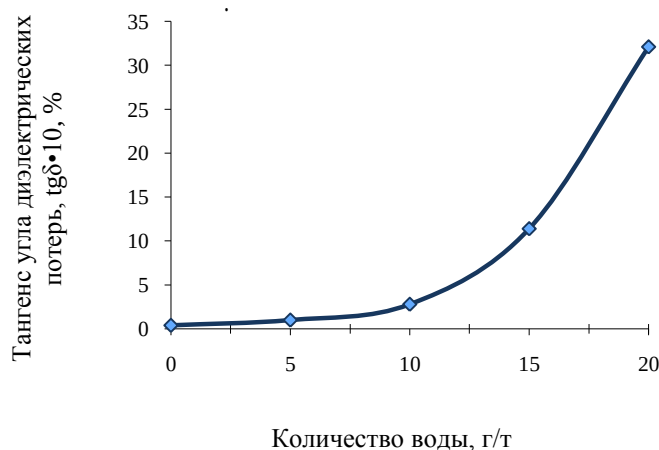


Рис.3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от концентрации воды в модельной смеси

Как видно из рис. 3, увеличение содержания воды в модельных смесях сопровождается увеличением диэлектрических потерь в них. Повышение концентрации воды в 4 раза (от 5 до 20 г/т масла) приводит к росту тангенса угла диэлектрических потерь в 5,5 раз.

Таким образом, проведенные исследования показали, что повышенные концентрации воды и сераорганических соединений в модельных смесях, в сочетании с действием рабочих температур и напряженности электрического поля в трансформаторах, способствуют увеличению диэлектрических потерь.

На рис. 4 показано влияние содержания воды в модельных смесях на их электрическую прочность.

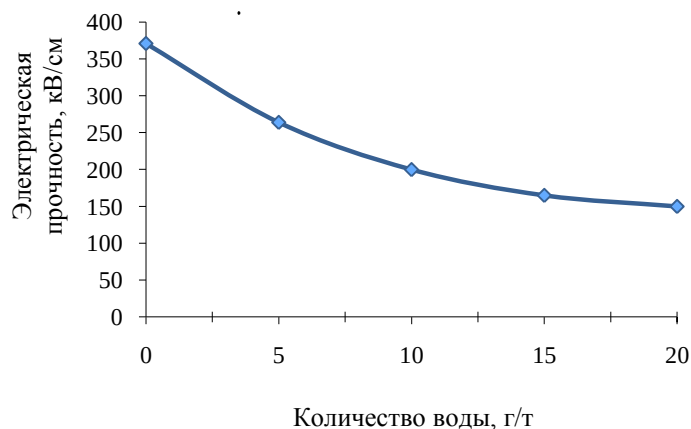


Рис.4. Зависимость электрической прочности от концентрации воды в модельной смеси

Из рис. 4 видно, что с повышением влажности смеси наблюдается снижение ее электрической прочности от 400 до 170 кВ/см, т.е. в 2,35 раза. Это связано с тем, что под действием электрического поля частички воды образуют цепочки, которые имеют направление вдоль силовых линий электрического поля. Для перекрытия по такой цепочке требуется значительно меньшее разрядное напряжение, чем для разряда в сухом масле [2].

#### Выводы

1. С использованием модельных смесей изучено зависимость растворения воды в масляной фракции от концентрации сераорганических соединений и температуры.

Установлено, что одновременное повышение температуры и концентрации сераорганических соединений в модельных смесях приводит к увеличению растворимости воды в последних.

2. Исследованы зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и электрической прочности от концентрации воды в модельных смесях.

Показано, что повышение концентрации воды и сераорганических соединений в модельных смесях в условиях, идентичных эксплуатационным, приводит к увеличению диэлектрических потерь в смесях и снижению их электрической прочности.

#### Литература

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.:Энергоиздат, 1983. 296 с.
2. Пястолов А.А. Оценка электроизоляционных показателей трансформаторного масла. //Сибирский вестник с.-х. науки. 1986. №3. С.101–104.
3. Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П. Адсорбционная осушка трансформаторного масла на природных цеолитах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2016. №2(№30). С.82–89.
4. Вилданов Р.Р., Тутубалина В.П. Концентрация воздуха в трансформаторном масле.LAMBERTAcademicPublishing, 2012. 129с.
5. Лядов Н.М., Туранова О.А., Козлов В.К., Гуранов А.М. Изменение состава и свойств соединений серы в процессе эксплуатации масла // Химия и технология топлив и масел. 2013. №4(578). С. 53–55.
6. W.Liu, Y.Song, Y.Li, R.Guo. Study on main impact factors of diesel deephydrodesulfurization reaction. // Petroleum Refinery Engineering. Nov. 2012.

7. Reeder P.L. Low waste technology in chemical industries. // Pure and Appl. Chem. 1998. V.56. №8.
8. Peorce A.W. Oil-hydrocarbonsor BTU'S. //Energie Did.1998. V.9. №3.
9. Харлампиди Х.Э., Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П. Влияние углеводородного состава и сернистых соединений на эксплуатационные свойства трансформаторного масла // Вестник технологического университета. 2016. Т.19, №6. С.5–7.
10. Харлампиди Х.Э. Сераорганические соединения нефти, методы очистки и модификации. // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т.6, №7. С. 42–46.

#### Авторы публикации

**Гайнуллина Лейсан Раисовна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий» (ЭЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail:gainullina7819@mail.ru.

**Тутубалина Валерия Павловна** – докт. техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

#### References

1. Lipstein R. A., Shakhnovich M. I. Transformer oil. M.: Energoizdat, 1983. 296 pages.
2. Pyastolov A. A. Assessment of electroinsulating indicators of transformer oil.//The Siberian bulletin of the a. sciences. 1986. No. 3. P. 101-104.
3. Gaynullina L. R., Tutubalina V.P. The adsorptive osushka of transformer oil on natural tseolitakh.//the Bulletin of the Kazan state power university. 2016. No. 2 (No. 30). P. 82-89.
4. Vildanov R. R., Tutubalina V.P. Concentration of air in transformer oil. LAMBERT academic Pabliahing, 2012. 129 pages.
5. Lyadov N. M., Turanova O. A., Kozlov V. K., Guranov A. M. Change of structure and properties of compounds of sulfur in use oils.//M.: Chemistry and technology of fuels and oils. 2013. No. 4(578). P. 53-55.
6. W.Liu, Y.Song, Y.Li, R.Guo. Study on main impact factors of diesel deep hydrodesulfurization reaction.//Petroleum Refinery Engineering. Nov. 2012.
7. Reeder P.L. Low waste technology in chemical industries.//Pure and Appl. Chem. 1998. V.56. No. 8.
8. Peorce A.W. Oil-hydrocarbonsor BTU'S.//Energie Did.1998. V.9. No. 3.
9. Harlampidi H. E., Gaynullina L. R., Tutubalina V.P. Influence of hydrocarbonic structure and sulphurous connections on operational properties of transformer oil.//Bulletin of technological university. 2016. T.19. No.6. P. 5-7.
10. Harlampidi H. E. Organosulfurof compound of oil, methods of cleaning and modification.//Sorosovsky educational magazine. 2000. T.6. No. 7. P. 42-46.

#### Authors of the publication

**Gainullina Leysan Raisovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Energy Supply Department of Enterprises and Energy and Resource-Saving Technologies of Kazan State Energy University (KSEU), E-mail: gainullina7819@mail.ru.

**Tutubalina Valeriya Pavlovna**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Kazan State Energy University (KSPU).

*Поступила в редакцию*

*20 июня 2017 г.*