

## ГАЗОСТОЙКОСТЬ И ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Л.Р. Гайнуллина, В.П. Тутубалина*

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия*

Изучена газостойкость и термическая стабильность трансформаторных масел марок ВГ, ГК и ТАп в электрическом поле высокой напряженности. Эти масла отличаются способом очистки, содержанием серы и структурно-групповым составом.

Экспериментально была установлена взаимосвязь газовыделения или газопоглощения исследованных масел от содержания в них ароматических углеводородов и общей серы.

Установлено, что с ростом количества ароматических углеводородов и сераорганических соединений в составе масла повышается газопоглощающая способность масел, что видно на примере масла ТАп. Снижение концентрации ароматических углеводородов и количества сераорганических соединений в масле сопровождается возрастанием газовыделения из испытанных масел ВГ и ГК.

Показано, что термическая стабильность к окислению углеводородов масел ВГ, ГК и ТАп и газообразование в них зависит от количества ароматических углеводородов и сераорганических соединений.

Эксплуатационные свойства трансформаторных масел определяются их газостойкостью и термической стабильностью в электрическом поле.

*Ключевые слова:* трансформаторное масло, сераорганические соединения, газостойкость, термическая стабильность.

### **Введение**

Нефтяные трансформаторные масла марок ВГ, ГК и другие применяются в качестве теплоотводящей и изолирующей среды в силовых трансформаторах высших классов напряжения и определяют электрическую прочность всей системы. Если в трансформаторах основной изолирующей средой является твердая компонента, например, целлюлозные материалы, то в этом случае масло используется для пропитки твердой составляющей изоляции [1].

Масло в трансформаторах работает в условиях высокой напряженности электрического поля, повышенных рабочих температур, при наличии кислорода воздуха, растворенного в его объеме, и в присутствии гетерогенных катализаторов, представленных металлическими конструкциями трансформатора. Поэтому, работая в таких жестких условиях трансформаторное масло подвержено быстрому старению с образованием газообразных, жидких и твердых продуктов окисления [2–7]. В этой связи к основным требованиям, предъявляемым к маслу, относятся термическая стабильность его углеводородов к окислению и газостойкость в электрическом поле высокой напряженности [8–13].

### **Экспериментальная часть**

Цель работы – исследование газостойкости и термической стабильности трансформаторных масел различного структурно-группового состава в электрическом поле высокой напряженности.

В качестве объектов исследования были использованы трансформаторные масла следующих марок:

ВГ (МЭС 60296–2003) – трансформаторное масло из парафинистых малосернистых нефтей с использованием гидрокаталитических процессов; применяется как в трансформаторах, так и в выпрямителях, выключателях и распределительных устройствах высших классов напряжения (до 1150 кВ). По нормативным эксплуатационным параметрам трансформаторное масло марки ВГ относится к IIА классу и удовлетворяет требованиям стандарта МЭК 296.

ГК (ТУ 38.101.890–81) – трансформаторное масло гидрокрекинга; применяется в силовых трансформаторах и реакторах напряжением до 1150 кВ включительно и полностью удовлетворяет требованиям стандарта МЭК 296 к маслам класса IIА.

ТАп (ТУ 38.101.0281–80) – трансформаторное масло адсорбционной очистки из анастасиевской нефти; применяется в силовых трансформаторах напряжением до 500 кВ включительно, можно использовать для доливок измерительных трансформаторов тока и напряжения, маслонеполненных вводов напряжением до 500 кВ включительно.

Газостойкость трансформаторных масел определяли в приборе, описанном в литературе [10]. Оценку газостойкости масел осуществляли по количеству поглотившегося или выделившегося газа. В качестве газовой среды над испытуемыми маслами использовали водород в соответствии с МЭК 606 28 А при напряжении электрического поля, равного 10 кВ в течение 2 ч.

В исследуемых маслах с использованием метода атомно-эмиссионной спектроскопии (ГОСТ 27566–87) был определен углеводородный состав масел (табл. 1).

Полученные экспериментальные результаты по газостойкости масел ВГ, ГК и ТАп представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что из испытуемых масел газопоглощающим является масло ТАп. Масло ВГ и ГК в атмосфере водорода в электрическом поле напряжением 10 кВ относятся к газовыделяющим маслам.

Сравнительный анализ экспериментальных данных, приведенных в табл. 1 и 2, показал, что трансформаторные масла марок ВГ и ГК, пребывая в электрическом поле, выделяют газы, т. е. данные масла относятся к газовыделяющим маслам. Данное явление подтверждается структурно-групповым составом масел. Масла марок ВГ и ГК содержат соответственно 4,3 и 3,2 % ароматических углеводородов, что в 3,3 и 4,4 раза меньше по сравнению с содержанием их в масле марки ТАп. Сравнительное содержание общей серы в трансформаторных маслах ВГ, ГК и ТАп показало, что масла ВГ и ГК содержат соответственно в 1,42 и в 1,9 раза общей серы меньше, чем масло ТАп.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что масло марки ТАп в своем составе содержит наибольшее количество ароматических углеводородов и общей серы по сравнению с маслами ВГ и ГК. Поэтому масло марки ТАп относится к газопоглощающим маслам, поскольку ароматические углеводороды и сераорганические соединения относятся к газопоглощающим элементам масла. Таким образом, увеличение доли ароматических соединений в сочета-

нии с повышенной концентрацией общей серы переводит трансформаторные масла в разряд газопоглощающих масел в электрическом поле высокой напряженности. Склонность трансформаторных масел к газовыделению в процессе эксплуатации не подчиняется линейной зависимости от соотношения атомов углерода в нафтеновых циклах и парафиновых цепях.

Следующая серия опытов была поставлена с целью установления термической стабильности масел ВГ, ГК и ТАп в электрическом поле напряженностью 49 кВ/см. Термическую стабильность испытуемых трансформаторных масел определяли по ГОСТ 982–80 при температуре 155 °С в течение 14 ч в установке, описанной в работе [10].

Экспериментальные данные приведены в табл. 3.

Под воздействием электрических разрядов в трансформаторных маслах выделяется, в основном, водород [14–18], и масло претерпевает необратимые превращения, проявляющиеся в увеличении диэлектрических потерь ( $tg \delta$ ), доли осадка и кислых соединений (см. табл. 3). Водород, в свою очередь, способствует созданию аварийной ситуации, связанной с повреждением электрооборудования, быстрому развитию дефектов трансформаторов, пробую прокладок и выводу из строя электронасосов [11].

В соответствии с табл. 3 лучшими характеристиками по термостабильности против окислительного превращения углеводородов в электрическом поле обладают трансформаторные масла ма-

Таблица 1

Структурно-групповой состав масел ВГ, ГК и ТАп

Элементы, входящие в состав масел	Трансформаторное масло		
	ВГ	ГК	ТАп
Парафино-нафтеновые углеводороды	95,58	96,71	85,63
Ароматические углеводороды	4,3	3,2	14,2
Общая сера	0,12	0,09	0,17

Таблица 2

Газостойкость трансформаторных масел в электрическом поле в среде водорода

Марка трансформаторного масла	Величина газостойкости, мкл/мин
ВГ	23,8
ГК	24,6
ТА	-7,9

Таблица 3

Термическая стабильность трансформаторных масел в электрическом поле напряженностью 49 кВ/см

Показатели	Трансформаторное масло		
	ВГ	ГК	ТАп
Выход летучих кислот, мг КОН на 1 г масла	0,03	0,025	0,098
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла	0,097	0,096	0,17
Массовая доля осадка, %	0,006	0,00	0,01
Тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С	0,11	0,10	0,47

рок ВГ и ГК, поскольку в своем составе содержат оптимальное количество ароматических соединений при минимальной концентрации общей серы.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что высокое содержание ароматических углеводородов и сераорганических соединений в маслах сопровождается снижением их термической стабильности против окисления. Ароматические углеводороды интенсифицируют процессы уплотнения углеводородов, содержащихся в объеме масла, ухудшая их эксплуатационные свойства. Поэтому основным показателем, обеспечивающим длительную, стабильную и безаварийную работу маслонеполненных силовых трансформаторов, является термостабильность масла в электрическом поле высокой напряженности.

Для современного трансформаторного оборудования очевидна тенденция к ограничению их массы и габаритных размеров, что способствует уменьшению масляных (изоляционных) промежутков и связано с сужением масляных каналов, приводящих к росту в них напряженности электрического поля. В связи с нарастанием напряженности электрического поля до 50 кВ/см и 75 кВ/см в трансформаторном оборудовании наблюдается воздействие электрического поля на масло, которое сопровождается интенсивным образованием газа и уменьшением электрической прочности изоляции трансформатора. Образовавшиеся в масле газовые включения способствуют развитию в последних ионизационных процессов, вызывающих активное старение жидкой изоляции, разрушение твердой целлюлозной изоляции, и в целом быстрому старению масла в процессе его эксплуатации.

Полученные результаты экспериментальных исследований показали, что процессы газовой выделенности или газопоглощения масел следует рассматривать совместно с их термической стабильностью при эксплуатации в электрооборудовании с высоким рабочим напряжением.

Таким образом, проведенные исследования показали, что лучшими маслами являются масла ВГ и ГК, которые характеризуются низким содержанием кислот, массовой доли осадка и минимальными диэлектрическими потерями в трансформаторном масле.

### Выводы

1. Изучены газостойкость и термическая стабильность трансформаторных масел марок ВГ, ГК и ТАп, отличающихся структурно-групповым составом, в электрическом поле напряженностью 49 кВ/см.

2. Наибольшей газопоглощающей способностью обладает масло ТАп, имеющее в своем составе наиболее высокое содержание ароматических углеводородов и общей серы по сравнению с маслами ВГ и ГК.

3. Установлена взаимосвязь газообразования и термической стабильности исследованных трансформаторных масел с их структурно-групповым составом и концентрацией общей серы.

4. Проведенные экспериментальные исследования показали, что наибольшей термической стабильностью обладают масла марок ВГ и ГК, относящиеся к газовыделяющим маслам. Вместе с тем масло ТАп, обладающее меньшей термической стабильностью, относится к газопоглощающим маслам. Поэтому их газостойкость и термическую стабильность в электрическом поле высокой напряженности следует рассматривать совместно.

### Литература

1. Липштейн, Р.А. Трансформаторное масло / Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович. – М.: Энергоиздат, 1983. – 296 с.

2. Study of aging products of transformer oil using scanning electron microscopy / N.M. Lyadov, O.A. Turanova, V.K. Kozlov, A.N. Turanov // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. – 2013. – Vol. 49, no. 4. – P. 362–367. DOI: 10.1007/s10553-013-0455-3

3. Корчевин, Е.Н. Газостойкость и окислительная стабильность трансформаторных масел в электрическом поле / Е.Н. Корчевин, В.П. Томин, Н.Г. Сосновская // *Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета*. – 2014. – Т. 1. – С. 142–144.

4. Experimental Study on Breakdown Characteristics of Transformer Oil Influenced by Bubbles / Chunxu Qin, Yan He, Bing Shi et al. // *Energies*. – 2018. – No. 11, 634. DOI: 10.3390/en11030634

5. Georgiev, A. Determination of oxidation products in transformer oils using FT-IR spectroscopy / A. Georgiev, I. Karamancheva, L. Topalova // *Molecular Structure*. – 2008. – Vol. 872, iss. 1. – P. 18–23. doi.org/10.1016/j.molstruc.2007.02.014

6. Review of Research Progress on the Electrical Properties and Modification of Mineral Insulating Oils Used in Power Transformers / Xiaobo Wang, Chao Tang, Bo Huang et al. // *Energies*. – 2018. – No. 11, 487. DOI: 10.3390/en11030487

7. Особенности старения трансформаторного масла в реальных условиях эксплуатации / Г.И. Ризванова, Л.Г. Гафиятуллин, М.Ш. Гарифуллин и др. // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2015. – № 9–10. – С. 91–94.

8. Влияние некоторых факторов на эксплуатационные свойства трансформаторного масла / А.В. Коваль, Р.Р. Вилданов, Л.Р. Гайнуллина и др. // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. – 2005. – № 1–2. – С. 100–104.

9. Ванин, Б.В. Методологические аспекты оценки степени старения изоляции обмоток силовых трансформаторов по измерению степени полимеризации / Б.В. Ванин, Я.В. Ланкау // *Электрические станции*. – 2001. – № 1. – С. 35–39.

10. Хабибуллина, Л.Р. Контроль состояния трансформаторного оборудования методом хроматографического анализа газосодержания в масле / Л.Р. Хабибуллина, А.В. Коваль, В.П. Тутубалина // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. – 2002. – № 5–6. – С. 20–25.

11. Prediction of Dissolved Gas Concentrations in Transformer Oil Based on the KPCA-FFOA-GRNN Model / Jun Lin, Gehao Sheng, Yingjie Yan et al. // *Energies*. – 2018. – No. 11. – P. 225. DOI: 10.3390/en11010225

12. Альмухаметов, И.И. Исследование взаимного влияния параметров трансформаторного масла / И.И. Альмухаметов, И.В. Давиденко // *Труды первой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института*. – Екатеринбург, 2016. – С. 167–170.

13. Диагностика трансформаторного масла / Е.Е. Константинова, З.Р. Гукетиев, Е.А. Вдовицкая, С.Э. Абрамян // *Научно-практическая студенческая конференция «Энергия будущего»*. – Ставрополь, 2016. – С. 81–86.

14. Михеев, Г.М. Экспериментальное исследование выделения водорода из диэлектрической жидкости методом лазерной спектроскопии / Г.М. Михеев // *Вестник Чувашского университета*. – 2013. – № 3. – С. 208–212.

15. Suwarno, Rizky Auglius Pasaribu. Thermal Aging of Mineral Oil-Paper Composite Insulation for High Voltage Transformer / Suwarno, Rizky Auglius Pasaribu // *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. – 2016. – Vol. 8, no. 4. – P. 819–834. DOI: 10.15676/ijeii.2016.8.4.9

16. Бычков, А.Л. Изучение растворения газовых пузырьков в трансформаторном масле / А.Л. Бычков, А.Ю. Рыжкина // *Наука. Промышленность. Оборона: тр. XI Всерос. науч.-техн. конф.* – Новосибирск, 2010. – С. 92–95.

17. Минлибаев, М.Р. Мониторинг содержания газов в трансформаторном масле / М.Р. Минлибаев, А.Р. Камалов // *Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные исследования в технических науках в условиях перехода предприятий на импортозамещение: проблемы и пути решения»*. – Стерлитамак, 2015. – С. 294–296.

18. О влиянии одиночных пузырьков газа на электрический пробой трансформаторного масла / А.В. Недоспасов, Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, М.Х. Гаджиев // *Журнал технической физики*. – 2015. – Т. 85, № 7. – С. 142–143.

Гайнуллина Лейсан Раисовна, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий», Казанский государственный энергетический университет, г. Казань; gainullina7819@mail.ru.

Тутубалина Валерия Павловна, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань.

Поступила в редакцию 19 августа 2018 г.

DOI: 10.14529/power180306

## GAS STABILITY AND THERMAL STABILITY OF TRANSFORMER OILS IN ELECTRIC FIELDS

L.R. Gainullina, gainullina7819@mail.ru,

V.P. Tutubalina

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

This paper presents analysis into the gas stability and thermal stability of ВГ, ГК, and ТАп transformer oils in a high-tension electric field. These oils differ in terms of purification method, sulfur content, and hydrocarbon-type composition.

Experiments indicate a correlation between gas absorption / gas emission of the studied oils and the content of aromatic hydrocarbons and general sulfur in the same oils.

Greater quantity of aromatic hydrocarbons and organosulfur compounds is found to increase gas absorption, which is demonstrated by the ТАп oil sample. Lesser concentration of aromatic hydrocarbons and organosulfur compounds increases the gas emission of the tested БГ and ГК oils.

It is demonstrated that the quantity of aromatic hydrocarbons and organosulfur compounds does affect the generation of gas in these three oil types, as well as the thermal stability of their hydrocarbons to oxidation.

Operating properties of transformer oils depend on their gas stability and thermal stability in electric fields.

*Keywords:* transformer oil, organosulfur compounds, gas stability, thermal stability.

### References

1. Lipstein R.A., Shakhnovich M.I. *Transformatornoye maslo* [Transformer Oil]. Moscow, Energoizdat Publ., 1983. 296 p.
2. Lyadov N.M., Turanova O.A., Kozlov V.K., Turanov A.N. Study of Aging Products of Transformer Oil Using Scanning Electron Microscopy. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 362–367. DOI: 10.1007/s10553-013-0455-3
3. Korchevin Ye.N., Tomin V.P., Sosnovskaya N.G. [Gas Stability and Oxidizing Stability of Transformer Oils in Electric Fields]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of Proceedings of Angarsk State Technical University]. Angarsk, 2014, vol. 1, pp. 142–144 (in Russ.)
4. Chunxu Qin, Yan He, Bing Shi, Tao Zhao, Fangcheng Lv, Xiangrui Cheng. Experimental Study on Breakdown Characteristics of Transformer Oil Influenced by Bubbles. *Energies*, 2018, no. 11, 634. DOI: 10.3390/en11030634
5. Georgiev A., Karamancheva I., Topalova L. Determination of Oxidation Products in Transformer Oils Using FT-IR Spectroscopy. *Molecular Structure*, 2008, vol. 872, iss. 1, pp. 18–23. doi.org/10.1016/j.molstruc.2007.02.014
6. Xiaobo Wang, Chao Tang, Bo Huang, Jian Hao, George Chen. Review of Research Progress on the Electrical Properties and Modification of Mineral Insulating Oils Used in Power Transformers. *Energies*, 2018, no. 11, 487. DOI: 10.3390/en11030487
7. Rizvanova G.I., Gafiyatullin L.G., Garifullin M.Sh., Kozlov V.K., Turanov A.N. [Particularities of Transformer Oil Aging in a Real-World Setting]. *Izvestiya vuzov. Problemy ehnergetiki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems], 2015, no. 9–10, pp. 91–94. (in Russ.)
8. Koval A.V., Vildanov R.R., Gaynullina L.R., Sidorenko A.V., Tutubalina V.P. [How Some Factors Affect the Operating Properties of Transformer Oil]. *Izvestiya vuzov. Problemy ehnergetiki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems], 2005, no. 1–2, pp. 100–104. (in Russ.)
9. Vanin B.V., Lankau Ya.V. [Methodological Aspects of Evaluating the Aging of Power-Transformer Winding Insulating by Measuring the Degree of Polymerization]. *Elektricheskie stancii* [Power Stations], 2001, no. 1, pp. 35–39 (in Russ.)
10. Habibullina L.R., Koval' A.V., Tutubalina V.P. [Monitoring the State of Transformer Equipment by Chromatography of Gas Content in Oil]. *Izvetiya vuzov. Problemy ehnergetiki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems], 2002, no. 5–6, pp. 20–25. (in Russ.)
11. Jun Lin, Gehao Sheng, Yingjie Yan, Jiejie Dai, Xiuchen Jiang. Prediction of Dissolved Gas Concentrations in Transformer Oil Based on the KPCA-FFOA-GRNN Model. *Energies*, 2018, no. 11, pp. 225. DOI: 10.3390/en11010225
12. Almukhametov I.I., Davidenko I.V. [How Transformer-Oil Parameters Affect Each Other]. *Trudy pervoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh Ural'skogo energeticheskogo instituta* [Proceedings of the First Scientific and Technical Conference of Young Scientists of Ural Power Engineering Institute], 2016, pp. 167–170. (in Russ.)
13. Konstantinova Ye.Ye., Gukepshev Z.R., Vdovickaya Ye.A., Abramyan S.Eh. [Diagnostics of Transformer Oil]. *Nauchno-prakticheskaya studencheskaya konferentsiya "Energiya budushchego"*. [Scientific and Practical Student Conference "Energy of the Future"]. Stavropol, 2016, pp. 81–86. (in Russ.)
14. Mikheyev G.M. [Experimental Study of Hydrogen Extraction From a Dielectric Fluid by Laser Spectroscopy]. *Vestnik chuvashskogo universiteta* [Bulletin of Chuvash University], 2013, no. 3, pp. 208–212. (in Russ.)
15. Suwarno, Rizky Auglius Pasaribu. Thermal Aging of Mineral Oil-Paper Composite Insulation for High Voltage Transformer. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 819–834. DOI: 10.15676/ijeii.2016.8.4.9
16. Bychkov A.L., Ryzhkina A.Yu. [Studying the Dissolution of Gas Bubbles in Transformer Oil]. *Nauka. Promyshlennost'. Oborona: trudy XI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Science. Industry. Defense: Proceedings of the 11th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Novosibirsk, 2010, pp. 92–95. (in Russ.)

17. Minlibayev M.R., Kamalov A.R. [Monitoring the Gas Content of Transformer Oil]. *Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem "Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya v tekhnicheskikh naukakh v usloviyakh pe-rekhoda predpriyatiy na importozameshcheniye: problemy i puti resheniya"* [Collection of Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation: Fundamental and Applied Engineering Research in the Context of Import Substitution in Businesses: Problems and Solutions]. Sterlitamak, 2015, pp. 294–296. (in Russ.)

18. Nedospasov A.V., Isakayev Eh.H., Tyufyayev A.S., Gadzhiyev M.H. [How Single Vials of Gas Affect the Electric Breakdown of Transformer Oil]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2015, vol. 85, no. 7, pp. 142–143. (in Russ.)

*Received 19 August 2018*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Гайнуллина, Л.Р. Газостойкость и термостабильность трансформаторных масел в электрическом поле / Л.Р. Гайнуллина, В.П. Тутубалина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 46–51. DOI: 10.14529/power180306

**FOR CITATION**

Gainullina L.R., Tutubalina V.P. Gas Stability and Thermal Stability of Transformer Oils in Electric Fields. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 46–51. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180306

---