

## ОСОБЕННОСТИ СТАРЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Г.И. РИЗВАНОВА\*, Л.Г. ГАФИЯТУЛЛИН\*\*, М.Ш. ГАРИФУЛЛИН\*, В.К. КОЗЛОВ\*,  
А.Н. ТУРАНОВ\*\*

\*Казанский государственный энергетический университет

\*\*Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН

*Методом УФ-спектроскопии изучены особенности старения трансформаторного масла в реальных условиях эксплуатации.*

*Ключевые слова: трансформаторное масло, УФ-спектроскопия.*

### Введение

Деградация трансформаторного масла (ТМ) оказывает значительное влияние на сроки и условия эксплуатации маслонаполненного оборудования в электроэнергетических системах [1, 2]. Можно перечислить 3 общепризнанных, на сегодняшний день, механизма старения ТМ: 1) образование перекисей, окислов, продуктов глубокого окисления, формирование твердых частиц, которые, достигнув некоторых размеров, выпадают в осадок; 2) полимеризация; и 3) образование Х-воска. Недавно нами было доказано существование еще одного механизма старения ТМ [3, 4]: в ходе эксплуатации ТМ увеличивается доля ароматических групп; затем молекулы с такими группами, как и в большинстве жидких нефтепродуктов [5, 6], самоорганизуются в надмолекулярные структуры [7] за счет межмолекулярных взаимодействий  $\pi$ -электронов ароматических колец, укрупняются, уплотняются и выпадают в осадок.

Однако увеличение молекулярной массы при старении ТМ очень незначительно, а образование Х-воска возможно лишь при участии в химических процессах соединений серы. Для трансформаторов основную роль играют окисление, сопровождающееся ростом кислотного числа (КЧ) ТМ, и ароматизация ТМ.

В представленной работе обсуждается влияние данных процессов на свойства ТМ, эксплуатируемых в реальных условиях энергосетей.

### Образцы и методика эксперимента

Образцы I-X – трансформаторные масла, эксплуатируемые в силовых трансформаторах 110 кВ или трансформаторах тока 110 кВ в ОАО «Сетевая компания» (Казанские электрические сети) и проанализированные с июня по сентябрь 2014 г. в испытательной лаборатории СИЗП. Все образцы удовлетворяют требованиям к качеству эксплуатационного масла и соответствуют СТО 70238424.27.100.053-2013. КЧ(I)= 0,006, КЧ(II)= 0,019, КЧ(III)= 0,0165, КЧ(IV)= 0,0084, КЧ(V)= 0,0038, КЧ(VI)= 0,0099, КЧ(VII)= 0,0024, КЧ(VIII)= 0,019, КЧ(IX)= 0,021, КЧ(X)= 0,019 мгКОН/г. В приведенном ряду с увеличением номера образца наблюдается изменение цвета ТМ от бледно-желтого до коричневого.

Спектры поглощения УФ и видимого диапазонов записаны при комнатной температуре в кюветах толщиной  $l = 10$  мм на спектрофотометре *Varian Cary 100* в диапазоне длин волн ( $\lambda$ ) 200 – 800 нм со скоростью 600 нм/мин при ширине щели 1,5 нм. Кювета сравнения пустая. Положение линий в спектрах приводится с точностью  $\pm 2,5$  нм. Спектры пропускания – в кюветах толщиной  $l = 50$  мм на спектрометре СФ-56 при аналогичных параметрах записи.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны спектры пропускания образцов I-X в видимом диапазоне. Основной результат, на котором следует сосредоточить внимание, следующий: коэффициент корреляции между коэффициентом пропускания  $\tau$  спектра ТМ при какой-либо длине волны и КЧ не превышает величину 0,5 для любой длины волны из изученного диапазона. Достаточно указать, что спектры образцов II, VIII и X, имеющих одинаковое КЧ= 0,019 мгКОН/г, находятся в противоположных, практически крайних, положениях на рис. 1, т.е. корреляционная связь очень слабая.

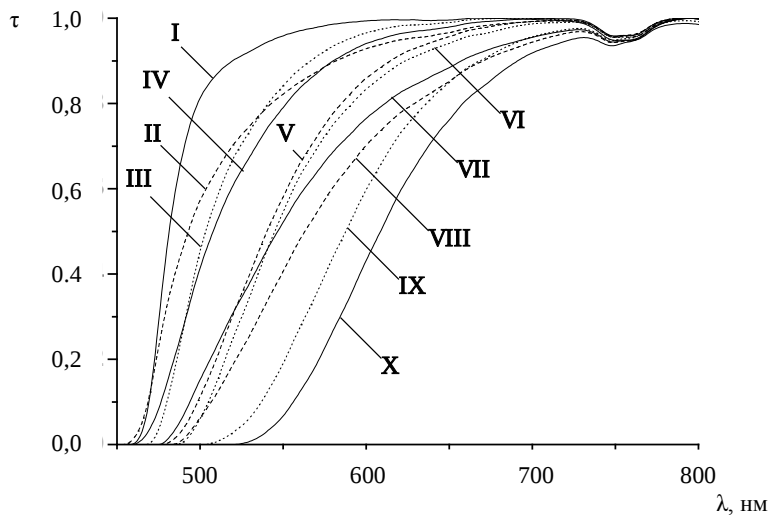


Рис. 1. Спектры пропускания образцов I-X в видимом диапазоне

В ранее опубликованной работе [8] представлены результаты, в которых при  $\lambda = 700$  нм была обнаружена строгая (коэффициент корреляции 0,999) корреляция между КЧ и  $\tau$  спектров ТМ, состаренных в модельных условиях. Для объяснения отличия в результатах необходимо учитывать разницу в условиях, в которых масла деградировали. На практике осуществляется непрерывная регенерация ТМ при естественной циркуляции масла сверху-вниз через термосифонный фильтр на основе термосифонного эффекта, а в адсорбционных фильтрах – с помощью принудительной циркуляции масла, создаваемой насосами охлаждения. В фильтры трансформаторов загружаются крупнопористые адсорбенты (количество 0,8 – 1,25 % от массы залитого масла, размер пор – 30 - 70 Å), которые активно поглощают из ТМ перекиси, окислы, органические кислоты, мыла, асфальто-смолистые соединения, воду и т.п. [9]. Это подтверждается низкими значениями КЧ ТМ, описываемых в представленной работе (ниже 0,021 мг КОН/г). В то же время в модельных экспериментах такая очистка ТМ не проводилась и, соответственно, продукты старения накапливались, а КЧ достигали значений 0,229 мг КОН/г [8].

УФ спектры поглощения всех изученных образцов ТМ показаны на рис. 2. Их расшифровка типична для масел и подробно описана в работах [3,10,11]. Линии при  $\lambda \approx 330$  и  $340$  нм принадлежат трициклическим молекулярным группам. Линия при  $\lambda \approx 380$  нм отнесена к сигналу антрацена и его производных (также трициклических), а при  $\lambda \approx 420$  и  $450$  нм – нафтацена (тетрациклических) [10]. Плавное увеличение оптической плотности ( $D$ ) при уменьшении  $\lambda$  от 800 к 350 нм, а также резкий рост  $D$  при  $\lambda \approx 350$  нм для изученных образцов объясняется поглощением при  $\lambda \approx 225$  нм

соединениями нафталинового ряда  $\lambda \approx 255 - 280$  нм бензола и его производных и рассеянием излучения малыми частицами (диаметром  $d < \lambda$ ) [11].

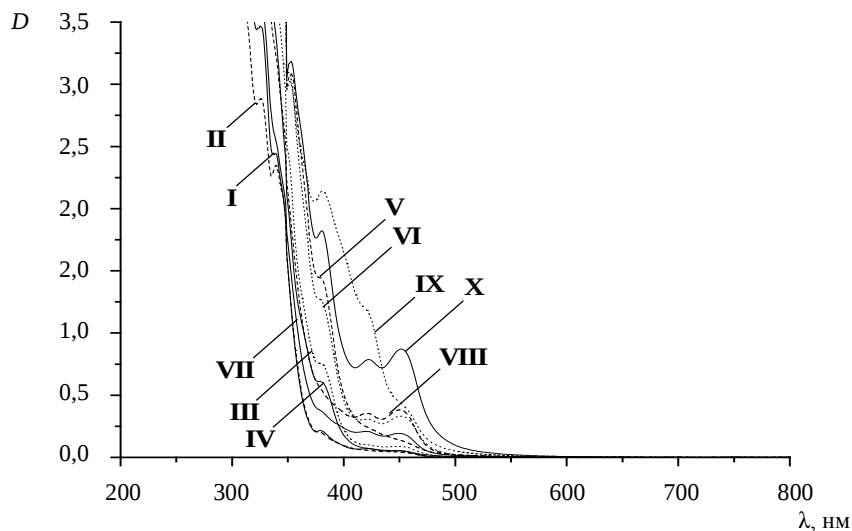


Рис. 2. Спектры поглощения образцов I-X в УФ и видимом диапазонах

Наличие в спектрах интенсивных линий от аренов подтверждает выводы, сделанные ранее [3,4,10,11], о том, что в ходе старения ТМ увеличивается доля ароматических соединений. Подчеркнем, что фильтры трансформаторов не поглощают данные соединения, т.к. не рассчитаны на такую задачу. Таким образом, образование твердотельных частиц в ТМ по механизму ароматизации оказывается вне контроля энергетиков, что приводит к сокращению срока службы оборудования. Кроме того, соединения аренового ряда не только вносят значительный вклад в процесс образования осадка, но и увеличивают гидрофильность ТМ.

Изменение окраски ТМ в процессе эксплуатации заслуживает отдельного обсуждения. Поскольку в исследованном ряду при увеличении номера образца цвет масла становится все более и более интенсивным, но отсутствует корреляция с КЧ, то становится очевидным, что нельзя считать продукты окисления основной причиной изменения цвета ТМ. С другой стороны, наглядное увеличение  $D$  от образца I к образцу X в области  $\lambda \approx 450$  нм позволяет утверждать, что цвет ТМ во многом определяется количеством ароматических групп в ТМ.

### Выводы

Методами спектроскопии в УФ и видимом диапазонах изучен ряд ТМ, эксплуатируемых в реальных условиях. Показано, что фильтры трансформаторов активно удаляют продукты старения, образующиеся в результате окислительных процессов, тогда как соединения, образующиеся в результате ароматизации, накапливаются в ТМ. Рост концентрации ароматических соединений при эксплуатации ТМ приводит к росту гидрофильности ТМ, ускорению процесса образования твердотельных частиц и, как следствие, к снижению изоляционных и теплоотводных характеристик масел. Цвет ТМ определяется концентрацией ароматических групп.

## Summary

**Features of transformer oil aging in actual use have been studied by UV-spectroscopy.**

**Keywords: transformer oil, UV-spectroscopy.**

## Литература

1. Wilson A.C.M. Insulating liquids: their uses, manufacture and properties. London, New York: Peter Peregrinus LTD. 980. 221 p.
2. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат. 1983. 296 с.
3. Kozlov V. Transformer oil and modern physics/Kozlov V., Turanov A.// IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2012. Vol. 19. Issue 5. p. 1485.
4. Туранова О.А. Исследование механизма образования осадка в трансформаторном масле марки ГК / О.А. Туранова, А.Е. Вандюков, В.К. Козлов, А.Н. Туранов // Оптика и спектроскопия. 2013. т. 114. № 4. С. 628.
5. Dickie J.P. Macrostructures of the Asphaltic Fractions by Various Instrumental Methods /Dickie J.P., Yen T.F.// Anal. Chem. 1967. Vol. 39. № 14. p. 1847.
6. Hasnaoui N. Study of asphaltene solutions by electrical conductivity measurements /Hasnaoui N., Achard C., Rogalski M.// Revue de L'institut francais du petrole. 1998. Vol. 53. № 1. p. 41.
7. Beaven G. The evaluation of gassing tendencies of insulating oils: apparatus, procedure, and effect of experimental variables /Beaven G., Cockburn I., Thompson C.// J. Inst. Petrol. 1949. Vol. 35. p. 735.
8. Гарифуллин М.Ш. Контроль технического состояния маслonaполненного трансформаторного электрооборудования методами оптической спектроскопии: дис... докт. техн. наук. Казань, 2014. 290 с.
9. Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел. РД 34.43.105-89. М.: СоюзТехЭнерго, 1989.
10. Гафиятуллин Л.Г. УФ спектроскопия трансформаторного масла ГК / Гафиятуллин Л.Г., Туранова О.А., Козлов В.К., Туранов А.Н.// Опт. и спектр. 2010. т. 109. № 1. с. 102.
11. Шкаликов А.В. О рассеянии света в трансформаторном масле / А.В. Шкаликов, Е.А. Юшкова, Л.Г. Гафиятуллин, Ю.Н. Осин, О.А. Туранова, В.К. Козлов, А.Н. Туранов // Опт. и спектр. 2011. т. 110. № 5. С. 750.

*Поступила в редакцию*

*29 декабря 2015 г.*

**Ризванова Гульназ Ильдусовна** – студент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(905)3114674. E-mail: gulnaz\_50@mail.ru.

**Гафиятуллин Линар Гадирович** – младший научный сотрудник лаборатории МРС Казанского физико-технического института. Тел.: 8(927)4093567. E-mail: lingafury@gmail.com.

**Гарифуллин Марсель Шарифьянович** – доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)5194272. E-mail: g\_marsel5@mail.ru.

**Козлов Владимир Константинович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и сети» (ЭСиС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)5194271. E-mail: kozlov\_vk@bk.ru.

**Туранов Александр Николаевич** – канд. физ.-мат. наук, лаборатории МРС Казанского физико-технического института. Тел.: 8(917)9397595. E-mail: sasha\_turanov@rambler.ru.