

## Повышение эксплуатационных свойств трансформаторного масла введением в его состав индивидуальных сернистых соединений

Вилданов Р. Р., канд. техн. наук, Тутубалина В. П., доктор техн. наук

Казанский государственный энергетический университет

Увеличение добычи сернистых нефтей привело к росту содержания сернистых соединений в получаемых из них трансформаторных маслах. Повышенное содержание серы обуславливает ухудшение эксплуатационных свойств масел и сопровождается коррозией трансформаторного оборудования. Исследования показали, что сернистые соединения могут быть использованы в качестве присадок для улучшения эксплуатационных характеристик трансформаторных масел. Изучено влияние антиокислительных присадок (метилфенилсульфида и дифенилсульфида) на термическую стабильность трансформаторного масла селективной очистки. Установлено, что присадка метилфенилсульфида, обладая высокими антиокислительными свойствами, позволяет повысить термическую стабильность масла при одновременном улучшении его диэлектрических показателей в работающем маслonaполненном электрическом оборудовании, увеличивая срок его службы и надежность эксплуатации на энергетических объектах.

**Ключевые слова:** трансформаторное масло, маслonaполненное электрическое оборудование, термическая стабильность, антиокислительные присадки.

В связи с ростом в мировом балансе добычи и переработки сернистых нефтей получаемые из них продукты, в том числе трансформаторные масла, обогащены серой, которая ухудшает качество нефтепродуктов и способствует коррозии оборудования, причем основная масса сернистых соединений концентрируется во фракциях, выкипающих при температурах до 500 °С [1, 2]. Для повышения качества нефтепродуктов применяют различные методы их очистки от сернистых соединений или комбинации методов очистки [1–3]. Вместе с тем известно, что сернистые соединения могут быть использованы в качестве присадок для улучшения качественных характеристик нефтепродуктов и их эксплуатационных свойств [4].

В данной статье представлены результаты исследования влияния синтетических индивидуальных сернистых соединений на эксплуатационные свойства трансформаторного масла селективной очистки, соответствующего ГОСТ 10121–76. Для упрощения изложения материала в дальнейшем это масло будем именовать маслом ТС.

В качестве индивидуальных сульфидов использованы метилфенилсульфид и дифенилсульфид в количестве от 0 до 1 % от массы масла. Физико-химические свойства сульфидов приведены в табл. 1.

Влияние индивидуальных сульфидов на эксплуатационные свойства масла ТС изучали в экспериментальной установке [5] в электрическом поле напряженностью 30 кВ/см при наличии медных и железных пластинок в количестве 0,2 и 0,3 см<sup>3</sup> на 1 г масла соответственно, входящих в конструкцию трансформатора и выполняющих роль гетерогенного катализатора, ускоряющего старение масла в процессе его эксплуатации. Это соответствует условиям эксплуатации масла в качестве жидкой изоляции в маслonaполненном оборудовании, поскольку в современном трансформаторном оборудовании оно находится в электрическом поле высокой напряженности при повышенных температурах и в присутствии конструкционных материалов трансформатора. Поэтому углеводороды масла должны обладать высокой термической стабильностью к окис-

Таблица 1

Сульфид	Индекс плотности при 20 °С $\rho_4^{20}$	Показатель преломления $n_D^{20}$	Элементный состав, %			Молекулярная масса
			Углерод С	Водород Н	Серa S	
Метилфенилсульфид (МФС)	1,0580	1,5869	67,69	6,49	25,82	124,207
Дифенилсульфид (ДФС)	1,1100	1,6309	77,37	5,41	17,22	186,279

Таблица 2

Образцы масла ТС	Стабильность по ГОСТ 982–80		
	Кислотное число, мгКОН/г масла	Осадок, %	Вода, %
Исходное масло ТС	0,01	0,002	0,001
Масло ТС + 0,5 % МФС	0,005	0	0
Масло ТС + 1 % МФС	0,007	0,001	0,001
Масло ТС + 0,5 % ДФС	0,01	0,001	0,0008
Масло ТС + 1 % ДФС	0,012	0,0015	0,0012

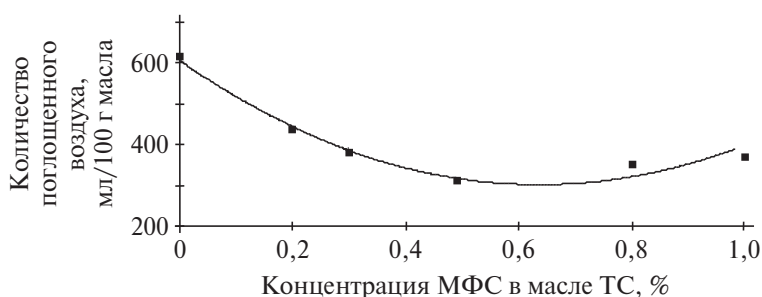


Рис. 1. Зависимость концентрации МФС от количества воздуха, поглощенного маслом:

$$Y(x) = 730,53x^2 - 951,11x + 609,1 \text{ при коэффициенте корреляции } R = 0,94$$

лению в электрическом поле при повышенных температурах.

Влияние индивидуальных сульфидов на термическую стабильность масла ТС изучали по ГОСТ 982–80. Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 2, из которой следует, что МФС в концентрации 0,5 % является эффективной антиокислительной присадкой. Введение же в состав масла ТС от 0,5 до 1,0 % ДФС по-прежнему не улучшает термическую стабильность масла к окислению. В связи с этим дальнейшие исследования были проведены с использованием в качестве антиокислительной присадки МФС. Так, в присутствии 0,5 % МФС в масле ТС, согласно данным табл. 2, образование кислых продуктов уменьшается в 2 раза; кроме того, не наблюдается образования воды и осадка. Это указывает на высокую антиокислительную способность присадки МФС, подавляющей окисление углеводородов ТС и таким образом замедляющей его старение.

Оптимальную концентрацию МФС определяли по количеству воздуха, поглощенного маслом ТС. Эксперимент в установке [5] проводили при температуре 100 °С в течение 40 ч. Во всех экспериментах в каждой экспериментальной точке было проведено по три парал-

лельных опыта для получения достоверных результатов.

Из рис. 1 следует, что с ростом концентрации МФС в масле от 0 до 0,49 % количество поглощенного воздуха уменьшается с 620 до 310 мл на 100 г масла, т. е. в 2 раза. Дальнейшее повышение концентрации МФС до 1,0 % приводит к повышению количества поглощенного воздуха с 310 до 370 мл на 100 г ТС, или в 1,19 раза. В связи с этим концентрацию МФС в масле ТС 0,49 % можно считать оптимальной, поскольку при такой концентрации маслом поглощается наименьшее количество воздуха. Поэтому все следующие опыты были проведены при концентрации МФС в масле, равной 0,49 %.

Старение трансформаторного масла определяется интенсивностью окислительных процессов, которые активизируются при наличии воздуха, особенно в негерметизированных конструкциях трансформаторов [6]. Основной характеристикой термической стабильности масла к окислению является кислотное число — количество образовавшихся продуктов окисления в масле.

Исследование влияния времени пребывания масла ТС в установке на значение кислотного числа проводили при 100 °С, так как эта температура характерна для верхних слоев

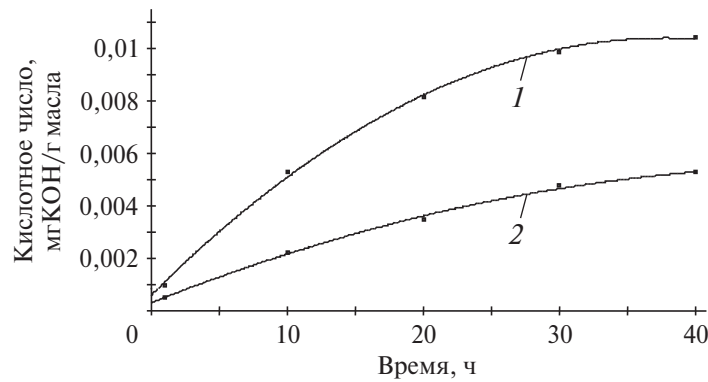


Рис. 2. Зависимости кислотного числа исходного масла ТС от времени пребывания его в установке:

1 — ТС с присадкой МФС:  $Y(x) = -(6,88 \cdot 10^{-6})x^2 + (5,21 \cdot 10^{-4})x + 5,97 \cdot 10^{-4}$  при  $R = 0,97$ ;

2 — ТС без присадки МФС:  $Y(x) = -(2,04 \cdot 10^{-6})x^2 + (2,07 \cdot 10^{-4})x + 3,09 \cdot 10^{-4}$  при  $R = 0,96$

масла в баке трансформатора (100–105 °С). Экспериментальные данные представлены в графическом виде на рис. 2. Для получения сравнительных характеристик на этом рисунке показано также влияние времени пребывания исходного масла ТС на кислотное число при отсутствии присадки МФС. Опыты проводили в идентичных условиях. В каждой точке кривых показаны средние значения кислотных чисел из трех параллельных опытов, что позволило получить их достоверные экспериментальные значения при наличии и отсутствии МФС.

Из рис. 2 следует, что в присутствии МФС окисление углеводородов протекает медленнее (кривая 1), чем при его отсутствии (кривая 2), т. е. в присутствии МФС старение масла ТС происходит значительно медленнее, а значит, можно увеличить срок его службы в трансформаторах. Это особенно важно в настоящее время в связи с увеличением стоимости трансформаторного масла на внутреннем и внешнем рынках.

Основными свойствами трансформаторного масла, применяемого в энергетике в качестве теплоотводящей и изолирующей среды в маслонаполненном электрооборудовании, являются пробивное напряжение и диэлектрические потери в масле, которые изменяются в процессе его старения и служат диагностическими признаками [6].

Следует отметить, что кислотное число, пробивное напряжение и диэлектрические потери характеризуют старение масла с разных сторон. Кислотное число характеризует стабильность масла при окислении. Пробивное напряжение и диэлектрические потери изменяются по мере старения масла и накопления продуктов окисления его углеводородов. Диэлектрические потери определяются

проводимостью масла, которая возрастает при его старении [6]. Поэтому данные параметры имеют самостоятельное диагностическое значение, взаимно дополняя друг друга.

Следующая серия опытов была проведена с целью определения влияния присадки МФС, введенной в количестве 0,49 % в масло ТС, на пробивное напряжение и диэлектрические потери (согласно ГОСТ 6581–75).

На рис. 3 приведены зависимости диэлектрических потерь в масле и значения пробивного напряжения от количества воздуха, растворенного в ТС. Как видно, введение в масло ТС антиокислительной присадки МФС способствует улучшению его диэлектрических свойств. Так, при концентрации воздуха, растворенного в масле ТС, равной 12 %, в присутствии 0,49 % МФС пробивное напряжение масла уменьшается в 1,17 раза, а диэлектрические потери возрастают в 1,5 раза по сравнению с исходным маслом ТС, в котором отсутствует растворенный воздух, поскольку масло было подвергнуто глубокой дегазации. Вместе с тем при увеличении концентрации растворенного воздуха в исходном масле до 12 % при отсутствии МФС пробивное напряжение уменьшается в 1,66 раза, а диэлектрические потери возрастают в 2,25 раза по сравнению с исходным маслом. Данное обстоятельство связано с тем, что антиокислительная присадка МФС, повышая термическую стабильность масла ТС (см. табл. 2), снижает количество продуктов его старения, способствующих ухудшению его диэлектрических свойств и уменьшению пробивного напряжения. К таким продуктам старения масла следует отнести воду и осадок [6], которые в присутствии антиокислительной присадки МФС полностью отсутствуют в масле ТС (см. табл. 2).

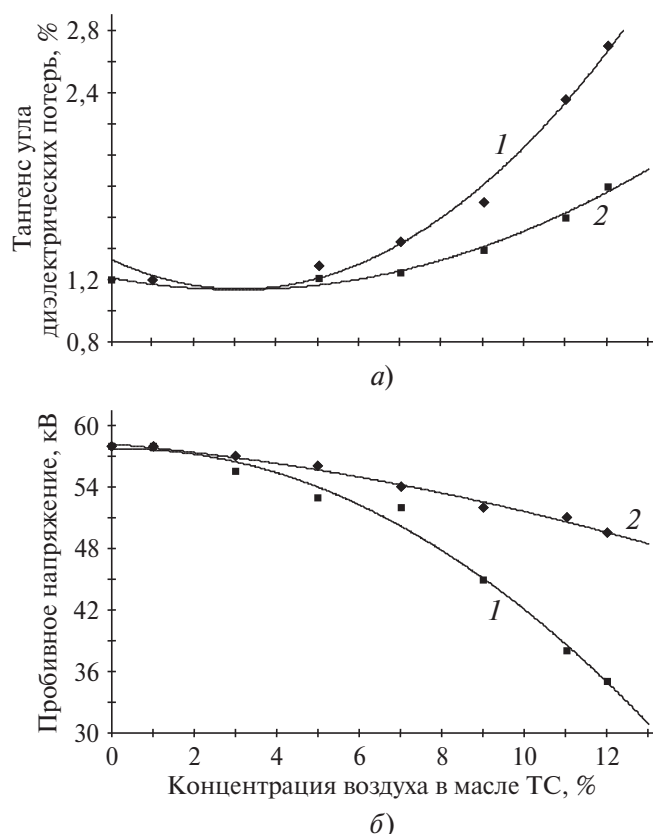


Рис. 3. Зависимости диэлектрических потерь в масле (а) и пробивного напряжения (б) от концентрации воздуха в масле ТС:

1 — ТС без присадки МФС:

$$Y(x) = 0,0079x^2 - 0,048x + 1,21 \text{ при } R = 0,94 \text{ (а);}$$

$$Y(x) = -0,03x^2 - 0,36x + 58,21 \text{ (б);}$$

2 — ТС с присадкой МФС:

$$Y(x) = 0,019x^2 - 0,12x + 1,33 \text{ при } R = 0,92 \text{ (а);}$$

$$Y(x) = -0,082x^2 - 0,46x + 58,04 \text{ (б)}$$

Результаты данного экспериментального исследования показывают, что МФС является хорошей антиокислительной присадкой, позволяющей повысить термическую стабильность масла ТС и уменьшить окисление углеводородов, входящих в его состав, растворенным в масле кислородом воздуха, который относится к главному катализатору старения масла в маслонаполненном электрическом оборудовании, например в негерметизированных конструкциях трансформаторов. Повышение термической стабильности трансформаторного масла в сочетании с

улучшением его диэлектрических свойств позволяет увеличить надежность и долговечность эксплуатации изоляции маслонаполненных трансформаторов, что в итоге приводит к росту надежности и стабильности электроснабжения в целом.

### Выводы

1. Метилфенилсульфид повышает термическую стабильность масла, о чем свидетельствует снижение кислотного числа в 2 раза по сравнению с исходным маслом при полном отсутствии воды и осадка. Дифенилсульфид практически не оказывает влияния на термическую стабильность масла.

2. Оптимальная концентрация антиокислительной присадки метилфенилсульфида к маслу составляет 0,49 %.

3. Метилфенилсульфид, повышая термическую стабильность масла, замедляет скорость его старения и снижение эксплуатационных свойств трансформаторного масла ТС как диэлектрика в маслонаполненном электрическом оборудовании на энергетических объектах.

### Список литературы

1. **Чертков Я. Б., Спиркин В. Г.** Сернистые и кислородные соединения нефтяных дистиллятов. — М.: Химия, 1971.
2. **Лукьянов М. М., Святых А. Б.** Способ контроля технического состояния жидкой изоляции маслонаполненного высоковольтного оборудования по структурно-чувствительному параметру. — Промышленная энергетика, 2013, № 7.
3. **Камьянов В. Ф., Аксенов В. С., Титов В. И.** Гетероатомные соединения нефтей. — Новосибирск: Наука, 1983.
4. **Машкина А. В.** Гетерогенный катализ в химии органических соединений серы. — Новосибирск: Наука, 1977.
5. **Вилданов Р. Р., Тутубалина В. П.** Установка для диагностики трансформаторного масла. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2006, № 9 – 10.
6. **Липштейн Р. А., Шахнович М. И.** Трансформаторное масло. — М.: Энергоиздат, 1983.

rustrenat@rambler.ru