

Нефтяное трансформаторное масло, являющееся жидкой изоляцией в трансформаторах, подвержено старению при рабочих температурах за счёт совместного воздействия на него молекулярного кислорода воздуха и электрического поля при наличии различных материалов, входящих в конструкцию трансформатора [1-4]. К основным параметрам, определяющим диэлектрические характеристики масла, относятся количество образовавшегося осадка, воды и величины кислотного числа тангенс угла диэлектрических потерь. Целью настоящего исследования является изучение влияния индивидуальных сернистых соединений на диэлектрические показатели трансформаторного масла. В качестве объекта исследования использовали трансформаторное масло марки ГК (ТУ 38.101.1025.85) с содержанием ароматических углеводородов 10,4% и общей серы 0,001% масс. Индивидуальными сульфидами служили α -нафтилдецилсульфид и циклогексилдецилсульфид, отличающиеся радикалами. Так, α -нафтилдецилсульфид содержит ароматический и алифатический радикал, а циклогексилдецилсульфид - нафтенный и алифатический радикалы. Количество сульфидов, вводимых в трансформаторное масло ГК, составляло 0,5% масс. в соответствии с литературными данными [5]. Исследование проводили на экспериментальной установке, имитирующей работу секции масляного трансформатора [6]. Изменение диэлектрических свойств трансформаторного масла ГК в присутствии и отсутствии индивидуальных сульфидов определяли по ГОСТ 982-80. Влияние температуры на образование осадка и величину кислотного числа в образцах трансформаторного масла ГК в присутствии и отсутствии индивидуальных сульфидов исследовали в температурном интервале 90-120°C по ГОСТ 982-80. Физико-химические характеристики индивидуальных сульфидов, количество образовавшегося осадка и величина кислотного числа масла марки ГК в зависимости от температуры в отсутствии и присутствии индивидуальных сульфидов приведены в табл.1 и 2. В соответствии с данными табл. 2 введение в масло ГК α -нафтилдецилсульфида и циклогексилдецилсульфида способствует уменьшению кислотного числа и количества образовавшегося осадка в масле. Из табл. 2 следует, что циклогексилдецилсульфид в исследуемой системе оказался более эффективным по сравнению с α -нафтилдецилсульфидом, поскольку в исследуемом диапазоне температур кислотное число снижается соответственно в 1,5 раза и 1,05 раза по сравнению с кислотным числом исходного масла ГК, а количество осадка - соответственно в 1,86 раза и 1,045 раза. Таблица 1 - Физико-химические свойства индивидуальных сульфидов

Сульфид	Формула сульфида
Молекулярный вес α -нафтилдецилсульфид	$S-C_{10}H_{21}$ 300
0,99	1,5729
циклогексилдецилсульфид	$S-C_{10}H_{21}$ 236
0,8909	1,4830

Влияние продолжительности пребывания трансформаторного масла ГК в присутствии и в отсутствии индивидуальных сульфидов на величину кислотного числа,

количество образовавшегося осадка и воды было изучено при температуре 100°C, которая характерна для верхних слоёв масла в баке трансформатора (не превышает 105°C). Полученные экспериментальные результаты представлены на рис.1-3. На рис.1 приведена зависимость изменения кислотного числа в присутствии и отсутствии индивидуальных сульфидов в зависимости от времени пребывания масла в экспериментальной установке. Таблица 2 - Влияние температуры на величину кислотного числа и количества образовавшегося осадка в течение 28 ч пребывания масла в экспериментальной установке

Показатели	Температура, °C	90	110	120
Масло ГК	Кислотное число, мгКОН/г масла	0,03	0,097	0,185
Масло ГК + 0,5 % α-нафтилдецилсульфид	Кислотное число, мгКОН/г масла	0,0045	0,018	0,378
Масло ГК + 0,5 % циклогексилдецилсульфид	Кислотное число, мгКОН/г масла	0,0286	0,092	0,176
Количество осадка, %		0,0043	0,0188	0,362

Рис. 1 - Зависимость изменения кислотного числа от времени пребывания масла в установке - масло ГК; - масло ГК + 0,5 % α-нафтилдецилсульфида; - масло ГК + 0,5 % циклогексилдецилсульфида

Из рис.1. следует, что введение в состав масла α-нафтилдецилсульфида незначительно снижает кислотное число в 1,08 раза по сравнению с кислотным числом исходного масла. Вместе с тем, в присутствии циклогексилдецилсульфида кислотное число уменьшается в 1,59 раза, что указывает на высокую ингибирующую способность данного индивидуального сульфида, замедляющего окисления углеводородов в масле. Влияние исследуемых сульфидов, на количество образовавшегося осадка в масле ГК в зависимости от продолжительности пребывания масла в экспериментальной установке, представлено на рис.2

Рис. 2 - Зависимость образования осадка от времени пребывания масла в установке - масло ГК; - масло ГК + 0,5 % α-нафтилдецилсульфида; - масло ГК + 0,5 % циклогексилдецилсульфида

Анализ экспериментальных данных, приведённых на рис.2, показал, что наибольшим ингибирующим эффектом обладает циклогексилдецилсульфид, в присутствии которого образование осадка снижается в 1,82 раза, по сравнению с содержанием последнего в исходном ингибированном масле. Рис. 3 - Зависимость образования воды от времени пребывания масла в установке - масло ГК; - масло ГК + 0,5 % α-нафтилдецилсульфида; - масло ГК + 0,5 % циклогексилдецилсульфида

Количество образовавшейся воды в зависимости от времени пребывания масла ГК в экспериментальной установке в присутствии и отсутствии индивидуальных сульфидов, отличающихся радикалами, представлено на рис.3. В соответствии с данными рис. 3 введение в состав масла α-нафтилдецилсульфида в количестве 0,5 %масс. снижает количество образовавшейся воды в масле за 28 часов 1,03 раза, в то время как в присутствии такого же количества циклогексилдецилсульфида приводит к снижению концентрации воды в масле в 1,62 по сравнению с исходным маслом.

Следующая серия опытов была проведена с целью исследования влияния изучаемых сульфидов на изменение тангенса угла диэлектрических потерь в масле ГК. Опыты проводили в соответствии с ГОСТ 6581-75 при температуре 90 °С, при этом другие технологические параметры процесса окисления углеводородов масла оставались неизменными. Результаты исследований показаны на рис.4. Рис. 4 - Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от времени пребывания масла в установке - масло ГК; - масло ГК + 0,5 % α-нафтилдецилсульфида; - масло ГК + 0,5 % циклогексилдецилсульфида. Из данных рис.4 следует, что введение в состав масла ГК индивидуальных сульфидов диэлектрические потери в масле снижаются, о чём свидетельствуют численные значения тангенса угла диэлектрических потерь. Из сравнения экспериментальных данных, приведённых на рис.4 следует, что наиболее активным ингибитором является циклогексилдецилсульфид, который в идентичных условиях и времени пребывания масла в экспериментальной установке 28 часов снижает диэлектрические потери в масле в 2,1 раза больше, чем α-нафтилдецилсульфид. Проведённые исследования показали, что циклогексилдецилсульфид относится к эффективным ингибиторам, замедляющим окисление углеводородов трансформаторного масла, и соответственно, улучшающим его эксплуатационные свойства. Влияние α-нафтилдецилсульфида и циклогексилдецилсульфида на количество поглощённого воздуха изучали при температуре 20 °С. Полученные данные сравнивали с количеством поглощённого воздуха в идентичных условиях с чистым маслом ГК без добавки сульфидов. Экспериментальные данные приведены на рис.5. При проведении данного эксперимента было учтено, что в основе старения трансформаторного масла находятся окислительные процессы углеводородов. В результате старения масла происходит ухудшение его диэлектрических свойств (рис.1-4). Обработка и обобщение экспериментальных результатов показала, что в присутствии циклогексилдецилсульфида диэлектрические свойства масла в значительной мере возрастают по сравнению с добавкой α-нафтилдецилсульфида (табл.2, рис.1-4). Основным инициатором старения масла в трансформаторах, особенно имеющим сообщение с воздухом, является воздух. Поэтому было изучено влияние исследуемых сульфидов на поглощение воздуха маслом. Влияние времени контакта на количество поглощённого воздуха маслом ГК в присутствии и отсутствии сульфидов масла показано на рис.5. Рис. 5 - Зависимость времени пребывания масла ГК в экспериментальной установке при 20 °С на количество поглощённого воздуха - масло ГК; - масло ГК + 0,5 % α-нафтилдецилсульфида; - масло ГК + 0,5 % циклогексилдецилсульфида. В соответствии с рис.5. при введении в масло ГК 0,5 % масс α-нафтилдецилсульфида количество поглощённого воздуха уменьшилось в 1,07 раза, а при добавлении такого же количества циклогексилдецилсульфида, количество поглощённого воздуха маслом ГК

снизилось в 1,73 раза. Это обстоятельство указывает на высокую эффективность циклогексилдецилсульфида, имеющий ароматические и нафтеновые радикалы в процессе поглощения воздуха. В результате уменьшения концентрации воздуха в масле замедляется окисление углеводородов. Воздух относится к основным газам, инициирующим процесс его старения. Поэтому при введении циклогексилдецилсульфида и α -нафтилдецилсульфида наблюдается улучшение диэлектрических свойств трансформаторного масла ГК. Причём наибольшей эффективностью в этом процессе обладает циклогексилдецилсульфид, т.к. количество поглощённого воздуха в 1,5 раза ниже в его присутствии, чем в присутствии α -нафтилдецилсульфида. Все исследованные параметры взаимосвязаны и определяют диэлектрические свойства масла. Так, например, при высокой концентрации воды в масле и снижении температуры, вода выделяется из масла в виде эмульсии, что увеличивает тангенс угла диэлектрических потерь, особенно при наличии осадка. Тангенс угла диэлектрических потерь относится к диагностическим параметрам, который увеличивается с ростом продуктов старения масла. Кислотное число характеризует стабильность масла к старению. Исследования показали, что снижение количества поглощённого воздуха маслом способствует уменьшению скорости его старения и улучшению диэлектрических свойств масла. Данное обстоятельство указывает, что основным параметром, способствующим старению масла и изменению его эксплуатационных свойств, является воздух, присутствующий в масле. В негерметизированных конструкциях трансформатора постоянно происходит поступление воздуха в масло, при одновременном влагообмене. Поэтому проведённое исследование влияния сульфидов на растворимость воздуха в масле является актуальным, поскольку позволяет улучшить диэлектрические свойства, а, следовательно, и увеличить срок эксплуатации его в трансформаторах. Выводы 1. Изучено влияние α -нафтилдецилсульфида и циклогексилдецилсульфида, отличающихся радикалами, на диэлектрические свойства масла ГК. 2. Показано, что наибольшим ингибирующим эффектом из исследованных сульфидов обладает циклогексилдецилсульфид, снижающий количество образовавшегося осадка в масле в 1,82 раза, воды - в 1,62 раза, кислотное число в 1,59 раза, тангенс угла диэлектрических потерь - 1,9 раза по сравнению с исходным маслом. 3. Изучено влияние индивидуальных сульфидов на количество поглощённого воздуха маслом. Показано, что в присутствии 0,5 %масс циклогексилдецилсульфида количество воздуха снижается в 1,73 раза по сравнению с содержанием воздуха в исходном масле, что способствует уменьшению окисления углеводородов масла и повышению его диэлектрических свойств.