



М. Н. ЛЮТИКОВА<sup>1</sup>  
С. В. НЕХОРОШЕВ<sup>2</sup>  
В. М. МУРАТОВА<sup>3</sup>  
П. Р. СЕМЕНЮК<sup>3</sup>  
А. С. ГАДЖИЕВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Филиал ПАО «Федеральная сетевая компания — Россети» — Ямало-Ненецкое предприятие магистральных электрических сетей, г. Ноябрьск

<sup>2</sup>Ханты-Мансийская государственная медицинская академия, г. Ханты-Мансийск

<sup>3</sup>Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

## О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ФЕНОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ МАСЛЕ

Известно, что для сдерживания процесса окисления трансформаторного масла, а соответственно, продления его ресурса, в него добавляется антиокислительная присадка ионол. Ранее специалистами с использованием метода хромато-масс-спектрометрии был установлен факт образования новых фенольных соединений в масле наряду с расходом ингибирующей присадки ионол, а именно 2,6-ди-*трет*-бутилфенол (2,6-ДТБФ) и 2,6-ди-*трет*-*p*-бензохинон. Данные фенольные соединения, так же как и ионол, относятся к классу пространственно-затрудненных фенолов, которые, в свою очередь, способны ингибировать процессы окисления масла в процессе его эксплуатации в маслонаполненном трансформаторном оборудовании, в частности в силовых трансформаторах и трансформаторах тока. В настоящей статье представлены результаты, показывающие, что по мере расхода ионола в масле из трансформаторов накапливается 2,6-ди-*трет*-бутилфенол. В наибольшей степени такая тенденция заметна для трансформаторов тока, оборудованных воздухоосушительными фильтрами (так называемое «свободное дыхание»). Образование 2,6-ДТБФ в масле может служить индикатором ускоренного старения масла в результате его длительного контакта с кислородом воздуха. Контроль изменения концентраций присадок в процессе старения масла осуществлялся с помощью разработанной нами новой методики, базирующейся на ИК-спектроскопии.

**Ключевые слова:** высоковольтный трансформатор, трансформаторное масло, антиокислительная присадка, фенольные соединения, ИК-спектроскопия, маркеры старения.

Основное назначение трансформаторного масла в высоковольтном оборудовании с бумажно-масляной изоляцией — обеспечение изоляции, эффективное охлаждение токоведущих частей высоковольтного оборудования, а также защита целлюлозы от переувлажнения. Для безупречного выполнения своих функций трансформаторное масло должно обладать хорошими электроизоляционными свойствами, а следовательно, высокой электрической прочностью, хорошей теплопроводностью, способностью сохранять свои основные свойства на протяжении продолжительного периода эксплуатации

при повышенных температурах и высоких электрических напряжениях [1]. С целью стабилизации и замедления процесса окисления трансформаторного масла в него, как правило, вводится антиокислительная присадка ионол.

Массовая концентрация ионола в свежих, неиспользованных маслах строго нормируется и составляет 0,2–0,4 %. В эксплуатационном трансформаторном масле — не менее 0,1 % масс [2]. Согласно работам Липштейна [3, 4], снижение концентрации ионола в рабочем трансформаторном масле до 0,1 % масс. и особенно до 0,05 % масс. недопустимо. Свя-

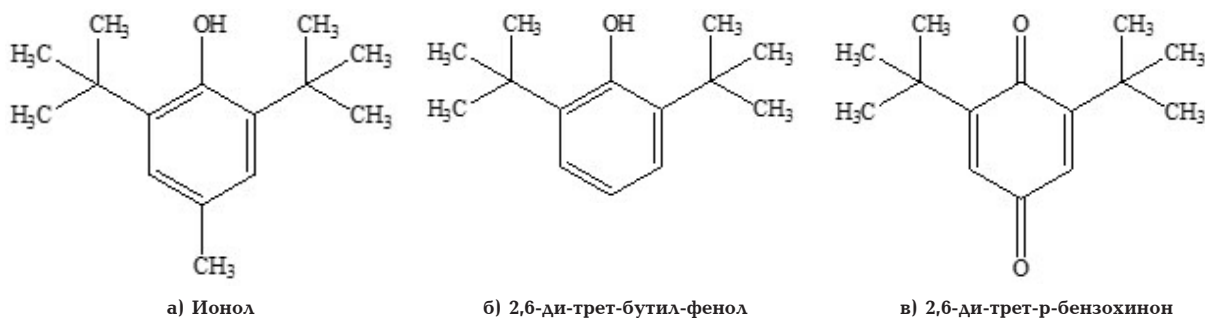


Рис. 1. Структурные формулы фенольных соединений, обнаруженных в эксплуатационном масле из высоковольтных трансформаторов

зано это с тем, что при достижении указанного уровня концентрации присадка проявляет проокислительные свойства, то есть не тормозит процесс окисления, а лавинообразно ускоряет его. Последнее означает, что процесс радикально-цепного окисления углеводородов масла протекает с огромной неконтролируемой скоростью. Однако многолетние регламентные испытания проб масла из действующего высоковольтного маслonaполненного оборудования (более 100 ед.) показали, что, несмотря на низкие концентрации ионола (менее 0,05 % масс.) в пробах масла, его электроизоляционные характеристики остаются на приемлемом эксплуатационном уровне [5]. В частности, значения таких показателей, как пробивное напряжение, тангенс угла диэлектрических потерь, кислотное число не выходят за предельные значения. Более того, коэффициент вариации значений указанных показателей не превышает 30 % за 12-летний период эксплуатации [5]. Последнее означает некоторую электрофизическую стабильность значений физико-химических показателей.

Ионол относится к соединениям фенольного типа, имеющего пространственно-затрудненное строение, его гидроксильная группа ОН экранирована с двух сторон третбутильными радикалами (рис. 1а) [6]. Именно благодаря своему строению данное соединение проявляет сильные ингибирующие свойства по отношению к активным углеводородным радикалам, образующимся при окислении трансформаторного масла. К таким же соединениям относятся 2,6-ди-трет-бутилфенол (далее — 2,6-ДТБФ) (рис. 1б) и 2,6-ди-трет-р-бензохинон (рис. 1в), которые ранее были идентифицированы в эксплуатационном масле разных марок (ГК, ВГ, ТКп, Т-750, Nytro 11GX) [7–9]. При этом установлено, что по мере расходования ионола в масле в наибольшем количестве накапливается 2,6-ДТБФ, а 2,6-ди-трет-р-бензохинон обнаружен в следовых количествах. Вполне вероятно, что данные соединения в совокупности с ионолом проявляют синергический эффект, обеспечивая продление ресурса трансформаторного масла.

В настоящей работе преследовалось несколько главных целей: 1) установление корреляционной зависимости между физико-химическими показателями при старении масла; 2) определение предельного уровня содержания ионола в присутствии 2,6-ДТБФ, ниже которого действительно будет наблюдаться существенное ухудшение других параметров трансформаторного масла. Определение массовой концентрации антиокислительной присадки ионол и 2,6-ди-трет-бутилфенол при их совместном присутствии в трансформаторном масле осу-

ществлялось с помощью разработанной нами новой методики, базирующейся на ИК-спектроскопии, которая впервые представлена в настоящей статье. Разработка новой методики и ее применение в настоящем эксперименте обусловлено несколькими факторами. Во-первых, несмотря на обилие методик анализа традиционной присадки, ни одна из них не позволяет определять другие фенольные соединения совместно с ионолом [10]. Во-вторых, следует отметить ряд преимуществ предлагаемой методики перед другими: экспрессность; простота; небольшой объем пробы (1 мл); безопасность для персонала и окружающей среды, так как не требует применения химических реактивов и их утилизации; небольшое количество расходных материалов и в целом невысокая себестоимость анализа.

**Основная часть.** В качестве объектов исследования использовались образцы эксплуатационного масла со сроком эксплуатации более 20 лет, парафинового масла марки ВГ без антиокислительной присадки ионол (базовое масло), порошкообразные антиокислительная присадка ионол (или 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол) и 2,6-ДТБФ (или 2,6-ди-трет-бутилфенол), а также растворы ионола и 2,6-ДТБФ в трансформаторном масле.

**Оборудование и условия проведения измерений:** ИК-Фурье-спектрометр ФТ-801, (ООО НПФ «СИ-МЕКС» г. Новосибирск), оснащенный приставкой для экспресс-анализа жидкостей с позиционной жидкостной микрокюветой из ZnSe (диаметр окон 10 мм, толщина окон — 2 мм) с изменяющейся в зависимости от номера позиции оправы толщиной слоя, имеющей четыре положения: 1 номер соответствует 0,015 мм, 2—0,125 мм, 3—0,285 мм, 4—0,555 мм соответственно [11]. Инфракрасные спектры получены в режиме пропускания, в диапазоне сканирования среднем инфракрасном от 500 до 4000 см<sup>-1</sup>. Спектры регистрировались со спектральным разрешением 4 см<sup>-1</sup> и количеством сканов 16. Полученные ИК-спектры обрабатывались в программном обеспечении ZaiR 3.5. Для регистрации одного ИК-спектра исследуемой жидкости необходимо не более 1 мл образца.

Градуировочные растворы фенолсодержащих ингибиторов готовили весовым методом, растворяя навеску ионола и 2,6-ди-трет-бутилфенола в базовом масле в полипропиленовых пробирках с последующим тщательным перемешиванием на встряхивателе для пробирок в течение 10 минут.

Для выполнения измерений несколько капель хорошо перемешанного образца базового масла (объемом около 50 мкл) помещали в центр подложки блока держателей. При этом следили за тем, чтобы между подложками кюветы не было пузырьков воз-

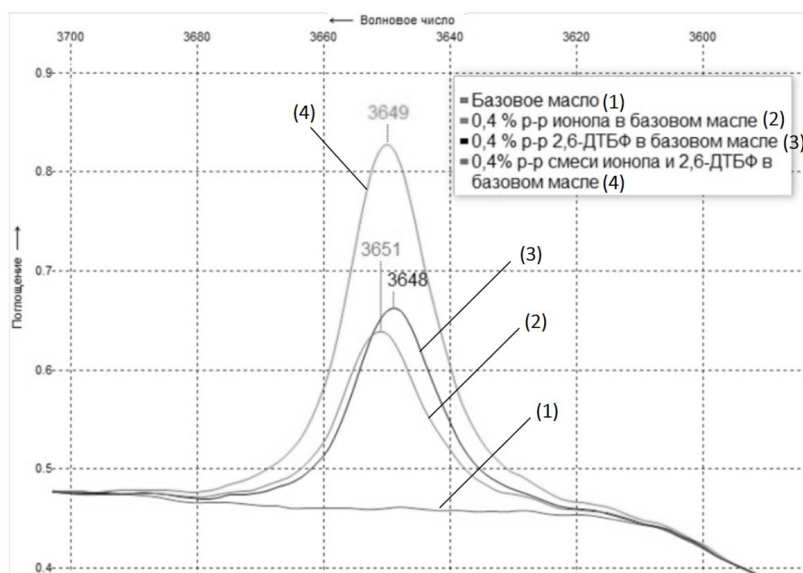


Рис. 2. ИК-спектры поглощения базового масла, 0,4% раствора ионола, 2,6-ДТБФ и их смеси в базовом масле, полученные в режиме пропускания на позиционной жидкостной кювете из ZnSe с толщиной слоя 0,555 мм в области 3700–3600  $\text{см}^{-1}$

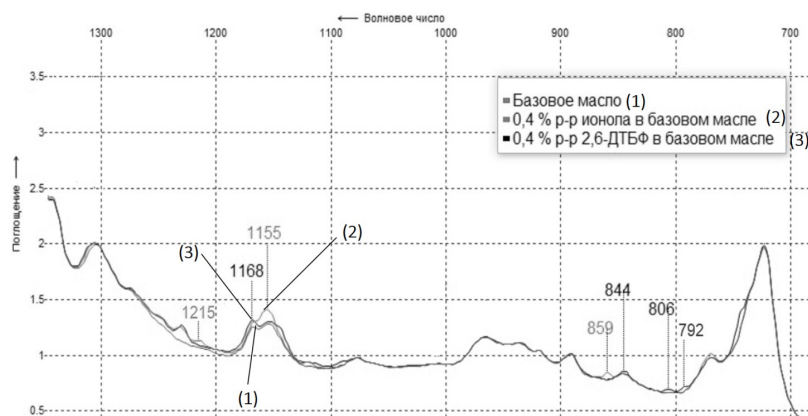


Рис. 3. ИК-спектры поглощения базового масла, 0,4% раствора ионола и 2,6-ДТБФ в базовом масле, полученные в режиме пропускания на позиционной жидкостной кювете из ZnSe с толщиной слоя 0,555 мм в области 1300–700  $\text{см}^{-1}$

духа. Устанавливали толщину слоя так, чтобы она соответствовала четвертому положению позиции оправы (0,555 мм). После чего записывали спектр образца в заданных условиях (условия записи опорного спектра и спектра образца должны быть идентичными).

На рис. 2 представлены ИК-спектры поглощения базового масла без каких-либо присадок, масла с содержанием ионола 0,4 % масс., масла с содержанием 2,6-ДТБФ 0,4 % масс., а также базового масла, ингибированного сразу двумя присадками (ионол и 2-ДТБФ).

На ИК-спектрах поглощения базового масла и растворов антиокислительных присадок в базовом масле, зарегистрированных в режиме пропускания на максимально возможной толщине слоя 0,555 мм, наблюдается интенсивная полоса поглощения в области 3700–3600  $\text{см}^{-1}$ , соответствующая валентным колебаниям связи О–Н в молекулах ингибиторов (рис. 1). Следует отметить, что положение максимума этой полосы поглощения у исследуемых ингибиторов окисления различается всего на 3  $\text{см}^{-1}$ :

для ионола максимум наблюдается на частоте 3651  $\text{см}^{-1}$ , для 2,6-ДТБФ — незначительно смещен в сторону низкочастотной области спектра 3648  $\text{см}^{-1}$ . В растворе смеси антиоксидантов максимум находится в промежуточном положении, и это обстоятельство не позволяет надежно дифференцировать эти присадки, что ранее было отмечено в [12]. Однако при сравнении двух антиокислительных присадок фенольного типа путем наложения спектров друг на друга, достаточно хорошо заметны отличия в области 700–1300  $\text{см}^{-1}$  (рис. 3).

В частности, спектры антиокислительных присадок отличаются по оптическому отношению полос поглощения в области колебаний связи С–О фенольного фрагмента. Так, максимум полосы поглощения в области 1168  $\text{см}^{-1}$  характерен для 2,6-ди-*трет*-бутилфенола, а в области 1155  $\text{см}^{-1}$  — для ионола.

На рис. 4 представлены результаты регистрации ИК-спектров поглощения градуировочных растворов антиокислительных присадок в базовом масле различных концентраций, измерены оптические плотности в области 3651  $\text{см}^{-1}$  и построены графи-

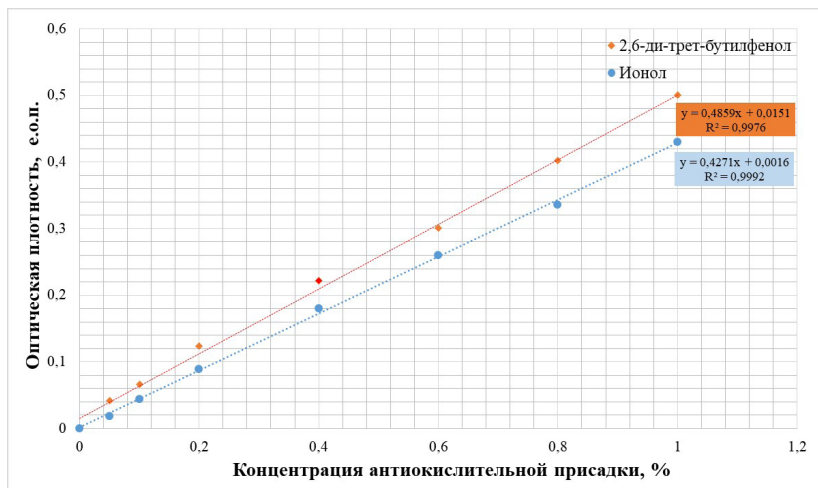


Рис. 4. Графическая зависимость оптической плотности максимума полосы поглощения фенольного фрагмента в молекулах антиокислительных присадок от их концентрации

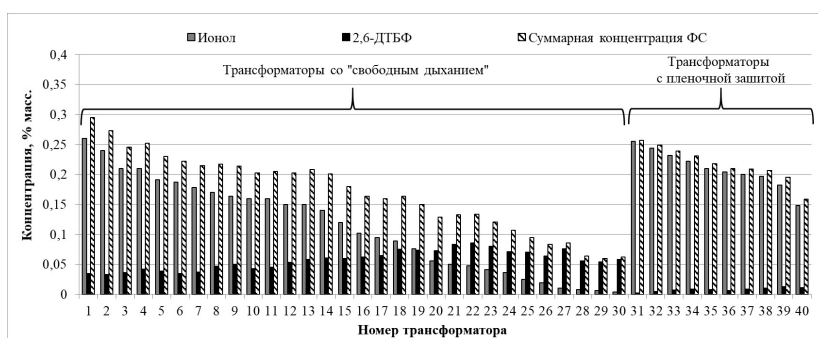


Рис. 5. Содержание фенольных соединений (ФС) в масле из высоковольтных трансформаторов

ческие зависимости положения максимума полосы поглощения от концентрации присадок.

Оптическая плотность максимума полосы поглощения фенольного фрагмента увеличивается с увеличением содержания ингибитора в градуировочных растворах. По сравнению с ионолом, у 2,6-ди-трет-бутилфенола наблюдается более интенсивный сигнал, поэтому перед выполнением количественного определения содержание ингибитора в трансформаторном масле необходимо дифференцировать присадку для исключения вклада систематической ошибки, который может достигать 15–20 %.

Правильность результатов анализа оценивали с помощью искусственных смесей ионол в базовом масле в диапазоне концентраций от 0,05 до 0,8 %. Для оценки метрологических характеристик каждый из 16 образцов проанализировали дважды в условиях повторяемости и внутрिलाбораторной прецизионности по двум параллельным определениям [13]. Применение приставки для экспресс-анализа жидкостей позволяет выполнять 15–20 единичных измерений в час. Статистическая обработка результатов показала, что дисперсии, рассчитанные для каждой пробы по критерию Кохрена и выборка по критерию Граббса однородны. Оценка повторяемости составила 0,9 %, воспроизводимости — 2,4 % при числе степеней свободы  $f=15$ . Показатель точности (границы относительной погрешности при вероятности  $P=0,95$ ) составил 7,2 %. Результаты подтверждены методом «введено — найдено».

На рис. 5 приведены концентрации ионола и 2,6-ДТБФ в пробах масла из высоковольтных трансформаторов напряжением 220 кВ (для примера показаны 40 проб из 320 проанализированных), измеренные по описанной выше методике. Из представленных данных видно, что концентрация 2,6-ДТБФ в масле из трансформаторов тока (ТТ, тип ТФЗМ) варьируется в пределах от 0,033 до 0,086 % по массе. В масле из силовых трансформаторов (СТ), имеющие пленочную защиту от окисления масла, массовое содержание 2,6-ДТБФ составляет 0,002–0,013 % масс. Трансформаторы тока типа ТФЗМ, в отличие от силовых трансформаторов, оборудованы воздухоосушительными фильтрами, заполненные силикагелем. Атмосферный воздух, проникающий в трансформатор при изменении объемов масла из-за температурных колебаний, проходит через слой силикагеля очищается от механических примесей и осушается от влаги. Согласно полученным результатам, очевидно, что 2,6-ДТБФ в наибольшем количестве образуется в масле из трансформаторов тока, оборудованных воздухоосушительными фильтрами (ВОФ), то есть ТТ, имеющие так называемое «свободное дыхание». Вероятно, скорость разложения и, соответственно, скорость образования 2,6-ди-трет-бутилфенола в масле в случае постоянного его соприкосновения с кислородом воздуха несколько выше по сравнению с силовыми трансформаторами, оборудованными герметичной защитой масла от окисления (пленочная защита). Следует также заметить, что 2,6-ДТБФ проявляет



заметную устойчивость, так как его содержание по мере выработки ионола возрастает (рис. 5).

Массовое содержание ионола во многих пробах масла находится ниже предельно допустимого значения (0,1 % масс.), и, вопреки выводам исследования [3], качество масла остается в удовлетворительном состоянии [5]. Как правило, по мере расходования присадки ионола значения показателей — тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С (ТАН), кислотное число (КЧ), оптическая мутность (ОМ) увеличиваются, что отрицательно сказывается на электроизоляционных свойствах масла [3]. Проведём корреляционно-регрессионный анализ и оценку характера связи физико-химических параметров на основе значений коэффициента корреляции Пирсона по уравнению 1.

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где  $x_i$  — значения переменной  $X$ ;  $y_i$  — значения переменной  $Y$ ;  $\bar{x}$  — среднее арифметическое переменной  $X$ ;  $\bar{y}$  — среднее арифметическое переменной  $Y$ .

В табл. 1 приведены значения коэффициента корреляции, рассчитанные по формуле 1 на основе массива данных, полученных в процессе многолетних регламентных испытаний проб масла из действующих высоковольтных трансформаторов.

Отрицательное значение коэффициента корреляции указывает, что по мере расходования присадки ионола значение КЧ, ТАН, ОМ изоляционного масла увеличивается. Отрицательное значение коэффициента корреляции для зависимости «ионол — 2,6-ДТБФ» свидетельствует о том, что в процессе расходования антиокислительной присадки ионол в масле образуется фенольное соединение — 2,6-ди-*трет*-бутилфенол.

Согласно полученным результатам, корреляция между содержанием антиокислительной присадки (ионол) и значением оптической мутности является наиболее сильной. Чем ниже концентрация ионола в окисленном масле, тем выше значение оптической мутности. Помутнение масла в эксплуатации свидетельствует о появлении в нем коллоидных соединений, укрупнение которых приводит к появлению осадка, ухудшающего отвод тепла от нагретых частей трансформатора и в целом снижающего изоляционные свойства масла. На рис. 6 приведена корреляционная зависимость оптической мутности от концентрации присадки ионола (а), а также суммарного содержания двух фенольных соединений — ионола и 2,6-ДТБФ (б).

Таблица 1

Корреляционная зависимость между физико-химическими показателями качества масла

Показатель	ТАН	КЧ	ОМ	2,6-ДТБФ
Ионол	−0,19	−0,20	−0,84	−0,81

Согласно [14], предельно допустимое значение оптической мутности составляет 40 м<sup>−1</sup>. При достижении данного значения и выше в масле начинаются опасные для изоляции процессы коллоидообразования [15]. Из полученных данных видно, что значение ОМ, равное 40 м<sup>−1</sup>, достигается, когда концентрация ионола в масле снижается до 0,02 % масс. (рис. 6а) или при суммарном содержании всех идентифицированных в масле соединений фенольной природы, равном 0,07 % масс. (рис. 6б). Напомним, что граничное значение массовой концентрации ионола в трансформаторном масле составляет 0,1 % масс. При достижении данного уровня концентрации ионола, согласно требованиям СТО [2], необходимо проводить мероприятия по добавлению ионола в масло, например, во время плановых ремонтов трансформаторов. Однако полученные нами данные, указывают на то, что показатели качества масла в эксплуатации начинают ухудшаться только лишь при существенном расходовании антиокислительной присадки, а именно при достижении концентрации ионола 0,02 % масс. Несмотря на низкое содержание ионола (0,02 % масс. против ПДЗ=0,1 % масс.), электрофизические показатели качества масла остаются на удовлетворительном уровне, что связано с наличием в масле не только целевого компонента, но и присутствием других соединений фенольного типа, проявляющих антиокислительные свойства [6]. Поэтому при планировании добавления присадки в масло в процессе эксплуатации трансформаторов следует опираться не только на массовую концентрацию ионола, но и на суммарное содержание всех фенольных соединений в масле, а именно ионол и 2,6-ди-*трет*-бутилфенол, которое составляет 0,07 % масс. Для контроля содержания всех фенольных соединений следует рассмотреть возможность введения в практику химических лабораторий электросетевых комплексов экспресс-методики определения присадок в трансформаторных маслах, представленной в настоящей статье, как альтернативный вариант быстрого определения суммарной концентрации фенольных соединений в эксплуатационном масле.

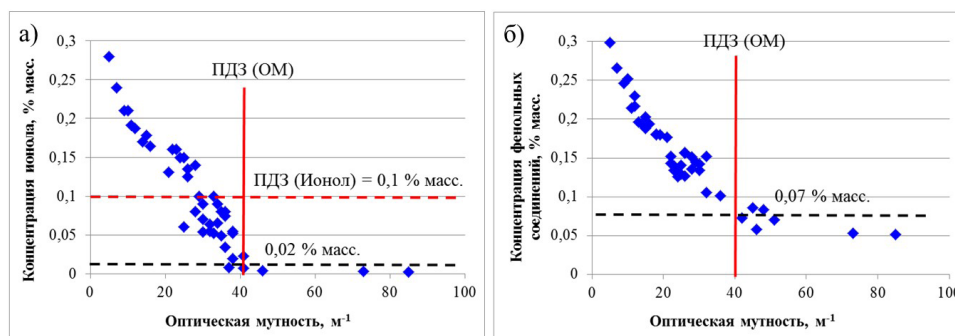


Рис. 6. Зависимость оптической мутности от концентрации присадки ионол (а) и суммарного содержания фенольных соединений — ионола и 2,6-ДТБФ (б)

**Заключение.** На основании многолетних плановых испытаний трансформаторного масла выявлено большое количество проб масла из баков трансформаторов, в которых содержание антиокислительной присадки (ионол) значительно ниже предельно допустимого значения. Концентрация присадки ниже 0,1 % масс. указывает на практически полную выработку ингибитора окисления в масле и должно сопровождаться ухудшением состояния масла. Однако, несмотря на низкие концентрации ионола, электроизоляционные характеристики масла остаются на высоком эксплуатационном уровне, что противоречит закономерности, ранее выявленной другими исследователями.

Установлено, что удовлетворительное состояние трансформаторного масла в эксплуатации обеспечивается наличием в нем не только традиционной присадки — ионол, но и второго фенольного соединения (2,6-ди-*трет*-бутилфенол). Данное соединение обладает антиокислительными свойствами и продолжает выполнять функции ингибитора.

Разработана и опробована методика количественного определения ионола и продуктов его разложения при одновременном присутствии, базирующаяся на ИК-спектроскопии. Данная методика рекомендована к введению в ежедневную лабораторную практику с целью контроля суммарного содержания фенольных соединений в масле (ионол; 2,6-ди-*трет*-бутилфенол). Реализация данной методики в любой электросетевой лаборатории позволит эффективно проводить измерения суммарного содержания фенольных соединений в масле с минимальным вложением физических и финансовых затрат.

Показано, что, по мере выработки ионола в масле, содержание 2,6-ди-*трет*-бутилфенола возрастает и становится намного больше, чем целевого компонента (ионол). Кроме того, в наибольших количествах образование 2,6-ДТБФ зафиксировано в трансформаторах со «свободным дыханием», что может служить дополнительным индикатором ускоренного старения масла в результате нарушения герметичности пленочной защиты масла от окисления в силовых трансформаторах.

При планировании добавления ионола в эксплуатационное масло следует опираться не только на концентрацию ионола, но и на суммарное содержание других фенольных соединений (ионол; 2,6-ди-*трет*-бутилфенол).

Согласно результатам, полученным в настоящей работе, добавление ионола в эксплуатационное масло с целью предотвращения ухудшения его изоляционных свойств следует проводить при достижении концентрации антиокислительной присадки ионол, равной 0,02 % масс., или при достижении суммарного содержания фенольных соединений (ионол; 2,6-ди-*трет*-бутилфенол) 0,07 % масс.

#### Библиографический список

1. Rafiq M., Shafique M., Azam A. [et al.]. Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications // *Molecules*. 2020. Vol. 25 (3901). P. 1–43. DOI: 10.3390/molecules25173901.
2. СТО 34.01-23.1-001–2017. Объем и нормы испытания электрооборудования. Введ. 2017–29–05. Москва: ПАО «Россети», 2017. 262 с.
3. Липштейн Р. А. О механизме действия ингибиторов окисления // *Присадки к маслам: тр. Второго Всесоюз. науч.-техн. совещания*. Москва: Химия, 1968. С. 169–177.

4. Липштейн Р. А., Шахнович М. И. Трансформаторное масло. 3-е изд. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 295 с.

5. Лютикова М. Н. Выяснение причины стабильности электрофизических показателей трансформаторного масла из баков измерительных трансформаторов тока // *Промышленная энергетика*. 2020. № 11. С. 2–9.

6. Рогинский В. А. Фенольные антиоксиданты. Реакционная способность и эффективность. Москва: Наука, 1988. 247 с.

7. Лютикова М. Н., Нехорошев С. В., Кукина В. М., Кульков М. Г. Идентификация примесей неизвестного состава в изоляционном масле методом хромато-масс-спектрометрии // *Электрические станции*. 2020. № 6 (1067). С. 47–53. EDN GUICZZ.

8. Лютикова М. Н., Нехорошев С. В., Кульков М. Г. Диагностирование состояния внутренней изоляции высоковольтного оборудования методом хромато-масс-спектрометрии // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2018. Т. 24, № 4. С. 118–131. DOI: 10.18721/JEST.24412.

9. Лютикова М. Н. Определение продуктов деструкции ионола в изоляционном нефтяном масле методом газожидкостной хроматографии с пламенно-ионизационным детектором // *Приборы*. 2022. № 12. С. 14–21.

10. Лютикова М. Н., Коробейников С. М., Коновалов А. А., Козлов В. К., Гарифуллин М. Ш. Контроль содержания антиокислительной присадки (ионол) в жидкой изоляции высоковольтного оборудования электросетевых предприятий современными инструментальными методами // *Электрические станции*. 2018. № 12. С. 43–51. EDN YUIWWT.

11. Жидкостная кювета с регулируемой толщиной слоя исследуемой жидкости. URL: [http://simex-ftir.ru/product\\_3-21.html](http://simex-ftir.ru/product_3-21.html) (дата обращения: 15.04.2023).

12. ГОСТ ИЕС 60666-2014. Масла изоляционные нефтяные: обнаружение и определение установленных присадок. Введ. 2016–07–01 // *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121828> (дата обращения: 06.05.2022).

13. РМГ 61-2010. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. Введ. 2012–09–01 // *Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094703> (дата обращения: 06.05.2022).

14. Методические указания по определению оптической мутности трансформаторного масла герметичных вводов 110 кВ и выше силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов: приказ РАО ЕЭС России № 497 от 07.08.2007. г. Москва: РАО ЕЭС России. 2007. 16 с.

15. Львов М. Ю. Коллоидно-дисперсные процессы в высоковольтных герметичных вводах трансформаторов // *Электрические станции*. 2000. № 4. С. 49–52.

**ЛЮТИКОВА Марина Николаевна**, кандидат химических наук, руководитель химической лаборатории Филиала ПАО «Россети» — Ямало-Ненецкое ПМЭС, г. Ноябрьск.

SPIN-код: 7758-4477

AuthorID (РИНЦ): 941492

ORCID: 0000-0002-0824-9025

ResearcherID: T-3409-2018

Адрес для переписки: m.lyutikova@mail.ru

**НЕХОРОШЕВ Сергей Викторович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории Ханты-Мансийской государственной медицинской академии, г. Ханты-Мансийск.

AuthorID (РИНЦ): 644160

AuthorID (SCOPUS): 14627428800

ORCID: 0000-0001-9175-2563

ResearcherID: M-5180-2014

Адрес для переписки: nekhoroshevs@yandex.ru

**МУРАТОВА Валерия Михайловна**, преподаватель  
Высшей нефтяной школы Югорского государственного университета (ЮГУ), г. Ханты-Мансийск.

SPIN-код: 5423-5409

AuthorID (РИНЦ): 1075702

ORCID: 0000-0001-9163-7792

Адрес для переписки: kuklinavm@gmail.com

**СЕМЕНЮК Павел Романович**, студент Института  
нефти и газа ЮГУ, г. Ханты-Мансийск.

Адрес для переписки: s\_e\_m\_k\_a@bk.ru

**ГАДЖИЕВА Айханум Сеферовна**, студентка Высшей нефтяной школы ЮГУ, г. Ханты-Мансийск.

SPIN-код: 7414-5902

AuthorID (РИНЦ): 1195073

ORCID: 0009-0004-9074-5096

Адрес для переписки: gaykhanoom@bk.ru

#### Для цитирования

Лютикова М. Н., Нехорошев С. В., Муратова В. М., Семенюк П. Р., Гаджиева А. С. О целесообразности контроля содержания фенольных соединений в трансформаторном масле // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 140–148. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-140-148.

Статья поступила в редакцию 22.04.2023 г.

© М. Н. Лютикова, С. В. Нехорошев, В. М. Муратова,  
П. Р. Семенюк, А. С. Гаджиева

## ON THE FEASIBILITY OF MONITORING THE CONTENT OF PHENOLIC COMPOUNDS IN TRANSFORMER OIL

It is known that in order to restrain the process of oxidation of transformer oil, and, accordingly, to extend its service life, an antioxidant additive ionol is added to it. Previously, specialists using the method of chromato-mass spectrometry established the fact of the formation of new phenolic compounds in oil along with the consumption of the inhibitory additive ionol, namely, 2,6-di-*tert*-butylphenol (2,6-DTBP) and 2, 6-di-*tert*-*p*-benzoquinone. These phenolic compounds, as well as ionol, belong to the class of sterically hindered phenols, which, in turn, are able to inhibit the oxidation of oil during its operation in oil-filled transformer equipment, in particular, power transformers and current transformers. This article presents results showing that as ionol is consumed, 2,6-di-*tert*-butylphenol accumulates in oil from transformers. To the greatest extent, this trend is noticeable for current transformers equipped with air-drying filters (the so-called "free breathing"). The formation of 2,6-DTBP in oil can serve as an indicator of accelerated aging of the oil as a result of its prolonged contact with atmospheric oxygen. Changes in additive concentrations during oil aging are controlled using a new technique developed by us, based on IR spectroscopy.

**Keywords:** high voltage transformer, transformer oil, antioxidant additive, phenolic compounds, IR spectroscopy, aging markers.

### References

1. Rafiq M., Shafique M., Azam A. [et al.]. Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications // *Molecules*. 2020. Vol. 25 (3901). P. 1–43. DOI: 10.3390/molecules25173901. (In Engl.).
2. STO 34.01-23.1-001–2017. Ob'yem i normy ispytaniya elektrooborudovaniya [Scope and standards for testing electrical equipment]. Moscow, 2017. 262 p. (In Russ.).
3. Lipshteyn R. A. O mekhanizme deystviya ingibitorov okisleniya [On the mechanism of action of oxidation inhibitors] // *Prisadki k maslam. Oil Additives*. Moscow, 1968. P. 169–177. (In Russ.).
4. Lipshteyn R. A., Shakhnovich M. I. Transformatornoye maslo [Transformer oil]. 3 rd. Moscow, 1983. 295 p. (In Russ.).
5. Lyutikova M. N. Vyyasneniye prichiny stabil'nosti elektrofizicheskikh pokazateley transformatornogo masla iz bakov izmeritel'nykh transformatorov toka [Finding out the reasons for the high frequency of electrophysical indicators of transformer oil from tanks of measuring current transformers] // *Promyshlennaya energetika. Industrial Power Engineering*. 2020. No. 11. P. 2–9. (In Russ.).
6. Roginskiy V. A. Fenol'nyye antioksidanty. Reaktsionnaya sposobnost' i effektivnost' [Phenolic antioxidants. Reactivity and efficacy]. Moscow, 1988. 247 p. (In Russ.).
7. Lyutikova M. N., Nekhoroshev S. V., Kuklina V. M., Kul'kov M. G. Identifikatsiya primesey neizvestnogo sostava v izolyatsionnom masle metodom khromato-mass-spektrometrii [Identification of impurities of unknown composition in the insulating oil by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)] // *Elektricheskiye stantsii. Electrical Stations*. 2020. No. 6 (1067). P. 47–53. EDN GUICZZ. (In Russ.).
8. Lyutikova M. N., Nekhoroshev S. V., Kul'kov M. G. Diagnostirovaniye sostoyaniya vnutrenney izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya metodom khromato-mass-spektrometrii [Diagnostics of internal isolation in high-voltage equipment by chromatography and mass spectrometry] // *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. St. Petersburg Polytechnic University Journal*



of Engineering Science and Technology. 2018. Vol. 24, no. 4. P. 118–131. DOI: 10.18721/JEST.24412. (In Russ.).

9. Lyutikova M. N. Opredeleniye produktov destrukttsii ionola v izolyatsionnom neftyanom masle metodom gazozhidkostnoy khromatografii s plammenno-ionizatsionnym detektorom [Determination of ionol degradation products in insulating petroleum oil by gas-liquid chromatography with a flame ionization detector] // *Pribory. Instruments. Pribory. Instruments*. 2022. No. 12. P. 14–21. (In Russ.).

10. Lyutikova M. N., Korobeynikov S. M., Konov A. A., Kozlov V. K., Garifullin M. Sh. Kontrol' soderzhaniya antiokislitel'noy prisadki (ionol) v zhidkoy izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya elektrosetevykh predpriyatiy sovremennymi instrumental'nymi metodami [Control of the antioxidant additive (Ionol) content in liquid insulation of high-voltage equipment in electric grid enterprises using modern instrumental methods] // *Elektricheskiye stantsii. Electrical Stations*. 2018. No. 12. P. 43–51. EDN YUIWWT. (In Russ.).

11. Zhidkostnaya kyuveta s reguliruyemoy tolshchinoy sloya issleduyemoy zhidkosti [Liquid cuvette with adjustable fluid layer thickness]. URL: [http://simex-ftir.ru/product\\_3-21.html](http://simex-ftir.ru/product_3-21.html) (accessed: 15.04.2023). (In Russ.).

12. GOST IEC 60666-2014. Masla izolyatsionnyye neftyanyye: obnaruzheniye i opredeleniye ustanovlennyykh prisadok [Mineral insulating oils. Detection and determination of specified additives]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121828> (accessed: 06.05.2022). (In Russ.).

13. RMG 61-2010. Indicators of accuracy, correctness, precision methods of quantitative chemical analysis. Evaluation methods [State system for ensuring the uniformity of measurements. Accuracy, trueness and precision measures of the procedures for quantitative chemical analysis. Methods of evaluation]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094703> (accessed: 06.05.2022). (In Russ.).

14. Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu opticheskoy mutnosti transformatornogo masla germetichnykh vvodov 110 kV i vyshe silovykh transformatorov i shuchntiruyushchikh reaktorov: prikaz RAO EES Rossii № 497 ot 07.08.2007 g. [Methodological guidelines for determining the optical turbidity of transformer oil of sealed bushings of 110 kV and above power transformers and shunt reactors: Order of RAO UES of Russia No. 497 of 07.08.2007]. Moscow, 2007. 16 p. (In Russ.).

15. L'vov M. Yu. Kolloidno-dispersnyye protsessy v vysokovol'tnykh germetichnykh vvodakh transformatorov [Mineral insulating oils. Detection and determination of specified additives] // *Elektricheskiye stantsii. Electrical Stations*. 2000. No. 4. P. 49–52. (In Russ.).

**LYUTIKOVA Marina Nikolayevna**, Candidate of Chemical Sciences, Head of Chemistry Laboratory, Branch of PJSC Federal Grid Company – Rosseti – Yamalo-Nenets Enterprise of main power grids, Noyabrsk.

SPIN-code: 7758-4477

AuthorID (RSCI): 941492

ORCID: 0000-0002-0824-9025

ResearcherID: T-3409-2018

Correspondence address: [m.lyutikova@mail.ru](mailto:m.lyutikova@mail.ru)

**NEKHOROSHEV Sergey Viktorovich**, Doctor of Technical Sciences, Chief Scientist at the Problematic Research Laboratory, Khanty-Mansiysk State Medical Academy, Khanty-Mansiysk.

AuthorID (RSCI): 644160

AuthorID (SCOPUS): 14627428800

ORCID: 0000-0001-9175-2563

ResearcherID: M-5180-2014

Correspondence address: [nekhroshevs@yandex.ru](mailto:nekhroshevs@yandex.ru)

**MURATOVA Valeriya Mikhaylovna**, Lecturer at a Higher Oil School, Ugra State University (USU), Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 5423-5409

AuthorID (RSCI): 1075702

ORCID: 0000-0001-9163-7792

Correspondence address: [kuklinavm@gmail.com](mailto:kuklinavm@gmail.com)

**SEMENYUK Pavel Romanovich**, Student of Oil and Gas Institute, USU, Khanty-Mansiysk.

Correspondence address: [s\\_e\\_m\\_k\\_a@bk.ru](mailto:s_e_m_k_a@bk.ru)

**GADZHIYEVA Aykhanum Seferovna**, Student at a Higher Oil School, USU, Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 7414-5902

AuthorID (RSCI): 1195073

ORCID: 0009-0004-9074-5096

Correspondence address: [gaykhanoom@bk.ru](mailto:gaykhanoom@bk.ru)

#### For citations

Lyutikova M. N., Nekhoroshev S. V., Muratova V. M., Semenyuk P. R., Gadzhieva A. S. On the feasibility of monitoring the content of phenolic compounds in transformer oil // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 140–148. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-140-148.

Received April 22, 2023.

© M. N. Lyutikova, S. V. Nekhoroshev, V. M. Muratova, P. R. Semenyuk, A. S. Gadzhieva