

# Исследование образования газов в диэлектрических жидкостях

М. Н. Лютикова, к. х. н.<sup>1, 2</sup>, А. В. Ридель, к. т. н.<sup>1</sup>, С. И. Сотников<sup>3</sup>

УДК 621.315.615:543.544.3

Контроль образования газов в жидких диэлектриках в процессе их эксплуатации в высоковольтных трансформаторах имеет огромное практическое значение в диагностике состояния внутренней изоляции маслонаполненного оборудования. По составу газовой смеси и динамике роста концентраций определенных газов можно получить ценную информацию о появлении и возможном характере дефекта внутри оборудования. Имеющиеся методики определения газов предназначены для мониторинга состояния электрооборудования, наполненного трансформаторным маслом, изготовленным на основе нефти. Между тем мировая электроэнергетика постепенно переходит на такие альтернативные жидкости, как натуральные и синтетические сложные эфиры, а также смеси этих эфиров с трансформаторным маслом. Сложноэфирные диэлектрические жидкости обладают высокой биоразлагаемостью, огнестойкостью, повышенной растворимостью воды без снижения электроизоляционных свойств. Они безопасны для окружающей среды и относятся к возобновляемым ресурсам. Их применение в высоковольтном оборудовании требует разработки методик контроля. В работе приведены результаты исследования образования газов под влиянием электрических разрядов в синтетической сложноэфирной жидкости, а также смесях трансформаторного масла с содержанием эфира от 5% до 30% по объему. Растворенные в жидкостях газы определяли на газовом хроматографе по новой методике, которая, в отличие от стандартной, позволяет определять не только водород –  $H_2$ , метан –  $CH_4$ , ацетилен –  $C_2H_2$ , этилен –  $C_2H_4$ , этан –  $C_2H_6$ , оксид углерода –  $CO$ , диоксид углерода –  $CO_2$ , кислород –  $O_2$ , азот –  $N_2$ , но и газы состава  $C_3$  (пропан –  $C_3H_8$ , пропилен –  $C_3H_6$ , пропин –  $C_3H_4$ ) и  $C_4$  (н-бутан –  $C_4H_{10}$ , бутен-1 –  $C_4H_8$ ).

**Ключевые слова:** изоляционное минеральное масло, сложноэфирная диэлектрическая жидкость, эфиромасляные смеси, газовая хроматография, образование горючих газов, сумма углеводородных газов

## Введение

В действующем высоковольтном трансформаторе основным фактором, определяющим износ изоляции под напряжением, является напряженность электрического поля. При высокой напряженности

в изоляции в местах с пониженной электрической прочностью возникают частичные разряды (ЧР). Известно, что из всех видов диэлектриков (твердых, жидких и газообразных) газы обладают самой низкой диэлектрической проницаемостью и малым пробивным напряжением. Поэтому слабыми местами в бумажно-масляной изоляции являются пузырьки газов [1–3].

От действия ЧР страдает, прежде всего, жидкая изоляция. Частичные разряды инициируют образование радикалов и химические реакции с их участием. Длительное воздействие ЧР ведет

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия.

<sup>2</sup> m.lyutikova@mail.ru.

<sup>3</sup> Филиал ПАО «Россети» – Ямало-Ненецкое ПМЭС, Ноябрьск, Россия.

к загрязнению изоляционной жидкости с увеличением проводимости и диэлектрических потерь за счет образования шлама и так называемого X-воска. Увеличение интенсивности ЧР приводит к образованию газовой фазы за счет быстрого выделения газообразных продуктов разложения жидкого диэлектрика. Появление газовых пузырей (которые не успели раствориться в жидкости) под действием ЧР или других более интенсивных электрических разрядов приводит к снижению напряженности и переходу ЧР в критическую форму [4-8]. Поскольку образование газов в изоляционной жидкости под воздействием ЧР представляет определенную опасность для нормальной эксплуатации высоковольтного оборудования, изучению этого процесса следует уделить особое внимание.

На сегодняшний день, жидким диэлектриком, который массово используется в качестве изоляционной и теплоотводящей среды в электрооборудовании остается трансформаторное масло. За 130 лет применения масла специалистами разработано огромное число методик измерения показателей и диагностирования состояния изоляции по номенклатуре

и значениям этих показателей [9-12]. Однако мировая электроэнергетика, преследуя экологические цели, все больше двигается в сторону применения таких альтернативных жидкостей, как биоразлагаемые натуральные и синтетические эфиры, а также смеси на их основе [13].

В отличие от трансформаторного масла, имеется ограниченное число публикаций о газообразовании, протекающем под влиянием разрядных процессов, в сложноэфирных жидкостях, в том числе синтетических сложных эфирах [14, 15]. Данные об этих процессах в эфиромасляных смесях вообще отсутствуют. Поэтому исследование образования газов в сложноэфирной диэлектрической жидкости и эфиромасляных смесях под воздействием разрядов является весьма актуальным.

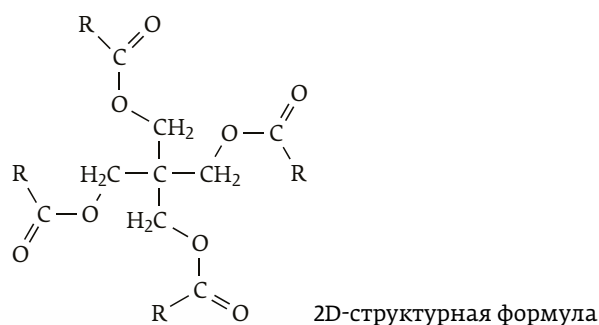
Целью настоящего исследования является определение состава газовой смеси, образующейся под влиянием разрядных процессов, в синтетической сложноэфирной жидкости и эфиромасляных смесях, с применением методики, основанной на газохроматографическом разделении и количественном определении смеси газов: водород -  $H_2$ , метан -  $CH_4$ , ацетилен -  $C_2H_2$ , этилен -  $C_2H_4$ , этан -  $C_2H_6$ , оксид углерода -  $CO$ , диоксид углерода -  $CO_2$ , кислород -  $O_2$ , азот -  $N_2$ , пропан -  $C_3H_8$ , пропилен -  $C_3H_6$ , пропин -  $C_3H_4$ , н-бутан -  $C_4H_{10}$ , бутен-1 -  $C_4H_8$  [16].

## Объекты и методика проведения исследования

### Объекты анализа

На хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ) поступили пробы изоляционных жидкостей (масло ТКп, синтетический сложный эфир Midel 7131, а также их смеси) до и после воздействия разрядных процессов.

В отличие от других марок масел, широко применяемых в электрооборудовании - ГК (парафиновое), ВГ (парафиновое), Nuro 11GX (нафтенное) и др., масло ТКп обладает повышенным содержанием ароматических углеводородов (более 15%). В силу этого масло ТКп характеризуется повышенной способностью образовывать осадки при длительном его окислении, что является крайне нежелательным явлением для надежной работы электрооборудования. Синтетический эфир Midel 7131 представляет собой сложный эфир четырехатомного спирта - пентаэритрита и карбоновых кислот (рис. 1) [17, 18]. Точный химический состав синтетического эфира является коммерческой тайной и не распространяется разработчиками компании M&I Materials Ltd. (Великобритания). Известно лишь, что число атомов углерода



$$R = C5 \div C22$$

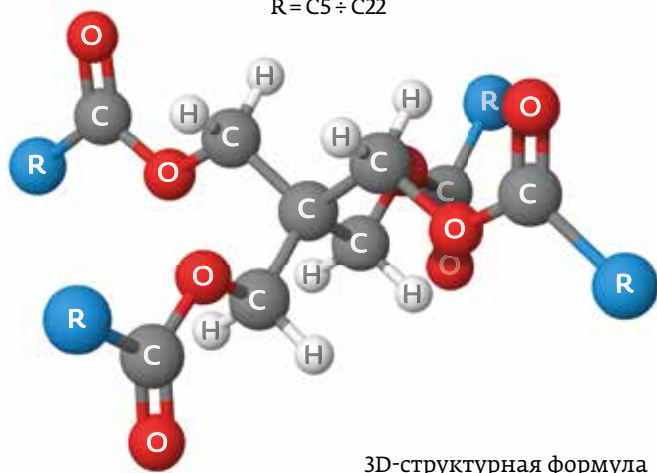


Рис. 1. Пример химической структуры молекулы синтетического эфира (пентаэритрита и карбоновых кислот)

в карбоксильном радикале может составлять от  $C_5$  до  $C_{22}$ , а структура этих радикалов может быть, как линейной, так и изомерной. Кроме того, все четыре сложноэфирные связи пентаэритрита содержат одни и те же жирные кислоты. Средняя молекулярная масса сложного эфира – порядка 678 г/моль [17, 18].

Как показали, предыдущие исследования [19, 20], добавление синтетического эфира к маслу ТКп приводит к улучшению его некоторых эксплуатационных характеристик: растворимость воды, температура вспышки, стабильность против окисления, пробивное напряжение. При добавлении эфира к маслу (в количестве более 10% по объему) значительно снижается вероятность образования хлопьевидного осадка, а также уменьшается коррозионная активность масла ТКп. Все это способствует надежной и продолжительной работе изоляционной системы любого высоковольтного трансформатора.

### Подготовка проб

Трансформаторное масло марки ТКп перед приготовлением смесей подвергалось очистке от воды (фильтрование через кассету с силикагелем марки КСКГ и цеолитом марки NaA), механических примесей (фильтрование через бумажный фильтр с размером пор 5–8 мкм), растворенных газов (вакуумирование). Контроль содержания воды, механических примесей, растворенных газов осуществляли по методикам [16, 21, 22]. Посредством перечисленных методов очистки масла были достигнуты минимальные значения показателей, в частности, содержание воды составило  $W = 3$  г/т, класс промышленной чистоты – КПЧ=4. Синтетическая сложноэфирная жидкость Midel 7131 поставляется в герметичных канистрах под вакуумом. Содержание воды в эфирной жидкости не превысило 10 г/т. Значения концентраций диагностируемых газов, как в масле, так и сложноэфирной

жидкости были близки к пределам обнаружения определяемых в диэлектрических жидкостях газов ( $H_2$  – не выше 5 ppm;  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$  – не выше 1 ppm;  $CO$ ,  $CO_2$  – не выше 20 ppm;  $O_2$ ,  $N_2$  – не выше 500 ppm;  $C_3H_8$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_3H_4$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $C_4H_8$  – не выше 10 ppm).

После подготовки масла ТКп производилось его смешивание с синтетической сложноэфирной жидкостью Midel 7131 в определенном объемном соотношении (табл. 1).

Объяснение выбора приготовленных смесей следующее. В работах [19, 20] было показано, что смеси трансформаторного масла с содержанием синтетического эфира 10, 20 и 30% являются наиболее подходящими для применения в качестве изолирующей и теплоотводящей среды для высоковольтного оборуования. Измеренные показатели (плотность, вязкость, тангенс угла диэлектрических потерь, относительная диэлектрическая проницаемость и др.) этих смесей соответствуют требованиям, предъявляемым к изоляционному маслу на нефтяной основе, что снижает необходимость кардинальной модификации электрооборудования.

### Условия воздействия на жидкости разрядами высокой энергии

Моделирование разрядов высокой энергии проводилось в ячейке стандартного пробойника с герметичной крышкой. Пробы масла, сложного эфира или их смесей помещались в ячейку с грибовидными электродами из латуни. Перед применением ячейки проводили полировку латунных электродов тонкой абразивной шкуркой, затем электроды и саму ячейку промывали последовательно гексаном и ацетоном [24]. Расстояние между электродами  $(2,50 \pm 0,05)$  мм. Скорость нарастания напряжения – 2 кВ в секунду. В автоматическом режиме выполнялось 48 пробоев с пятиминутным перерывом между пробоями (8 серий по 6 последовательных пробоев в каждой). После каждого пробоя производилось перемешивание жидкости внутри ячейки с помощью магнитного якоря.

### Определение газов, растворенных в изоляционных жидкостях

После проведения нескольких серий пробоев изоляционные жидкости отбирали в пробоотборные устройства Elchrom (рис. 2). Для определения газов, растворенных в масле и эфиромасляных смесях, применяли расширенную методику (14 компонентов: водород –  $H_2$ , метан –  $CH_4$ , ацетилен –  $C_2H_2$ , этилен –  $C_2H_4$ , этан –  $C_2H_6$ , оксид углерода –  $CO$ , диоксид углерода –  $CO_2$ , кислород –  $O_2$ , азот –  $N_2$ , пропан –  $C_3H_8$ , пропилен –  $C_3H_6$ , пропин –  $C_3H_4$ ,  $C_4$  (н-бутан –  $C_4H_{10}$ , бутен-1 –  $C_4H_8$ ) [16])

Таблица 1. Описание образцов диэлектрических жидкостей

Доля минерального масла (ТКп) и синтетического эфира (СЭ) в смеси по объему, %		Обозначение
ТКп	СЭ	
100	0	ТКп
95	5	ТКп(95):СЭ(5)
90	10	ТКп(90):СЭ(10)
80	20	ТКп(80):СЭ(20)
70	30	ТКп(70):СЭ(30)
0	100	СЭ

взамен стандартной, которая позволяет проводить количественное определение только первых девяти газов [23]. Предлагаемая методика [16] отличается от методики [23] тем, что в качестве насадочной колонки, на которой происходит разделение газов  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_3\text{H}_4$ ,  $\text{C}_4\text{H}_8$ ,  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , используется колонка с полимерным сорбентом *HayeSep N*, удлиненная хроматографическая колонка с адсорбентом *HayeSep Q*. Кроме того, разделение компонентов газовой фазы проводится в программируемом режиме с регулированием скорости подъема температуры термостата колонок [16].

Отбор проб масла производился в стеклянные шприцы *Elchrom* емкостью  $20 \text{ см}^3$ . Извлечение газов из масла выполнялось методом анализа равновесного пара (АРП), который заключается в извлечении инертным газом растворенных в масле газовых компонентов до их равновесного распределения между диэлектрической жидкостью и газовой фазой в герметичном проботборнике *Elchrom* при комнатной температуре и атмосферном давлении. В качестве газа-экстрагента и газа-носителя использовался аргон с содержанием основного вещества не менее 99,9995%. Соотношение изоляционной жидкости и газа-экстрагента составляло 1 : 1, а именно,  $10 \text{ см}^3$  масла и  $10 \text{ см}^3$  аргона. Ввод аргона в надмасляное пространство осуществлялся с помощью специального крана дозатора, оборудованного регулятором давления. Для наполнения аргоном шприц с жидкостью устанавливался канюлей вверх и присоединялся к трубопроводу с инертным газом. При заполнении его аргоном, шток поршня придерживался рукой, чтобы исключить его самопроизвольное опускание и зафиксировать шток в нужном положении. Необходимое давление газа-носителя при заполнении шприца аргоном составляет  $0,5 \text{ кг/см}^2$ . С целью достижения равновесного распределения газовых компонентов между жидкой и газовой фазами, шприц с диэлектрической жидкостью устанавливался в орбитальный шейкер *OS-20*. Извлечение проводилось в течение 7 мин со скоростью перемешивания 100 об/мин. Режимы перемешивания были установлены ранее дополнительными экспериментами, путем построения графической зависимости сигнала детектора (пламенно-ионизационного) наиболее растворимого в диэлектрической жидкости газа (бутан  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) от времени контакта фаз.

Хроматографирование газовой фазы, взятой из надмаслянного пространства, проводили в нескольких насадочных колонках: 1) длиной 1 м с адсорбентом *HayeSep Q* последовательно соединенной с 3 м колонкой *HayeSep N* (колонка М 3 м × 2 мм *HayeSep N 80/100 mesh*); 2) с молекулярными ситами

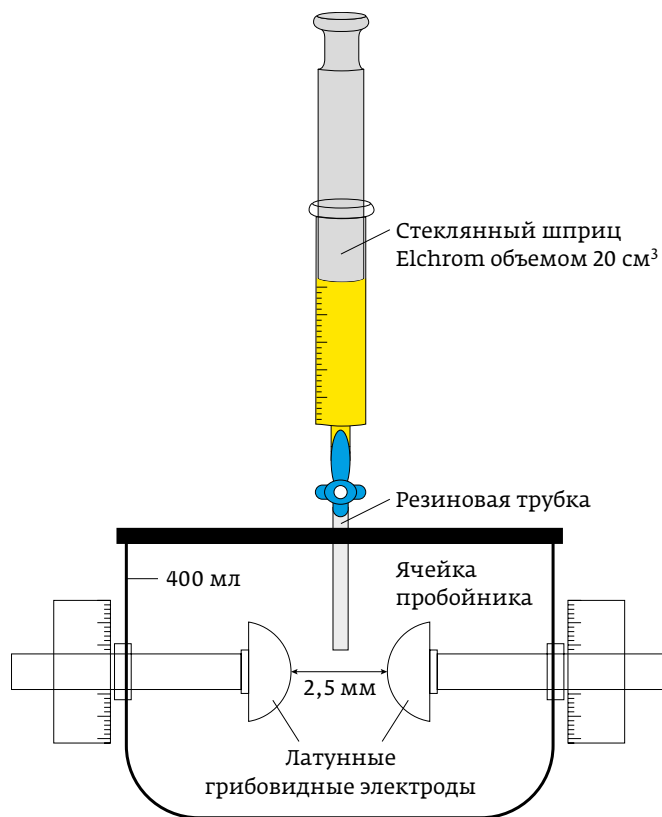
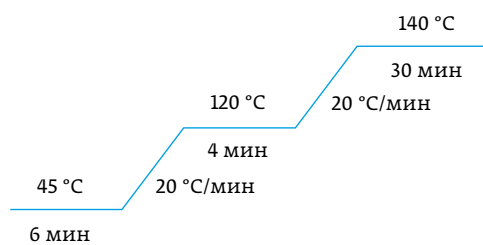
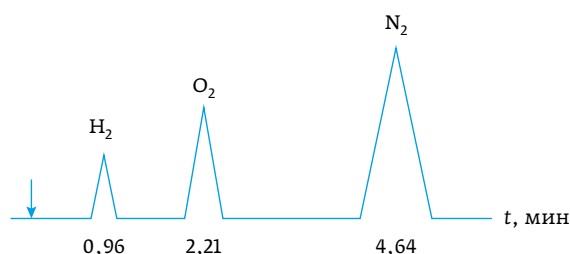
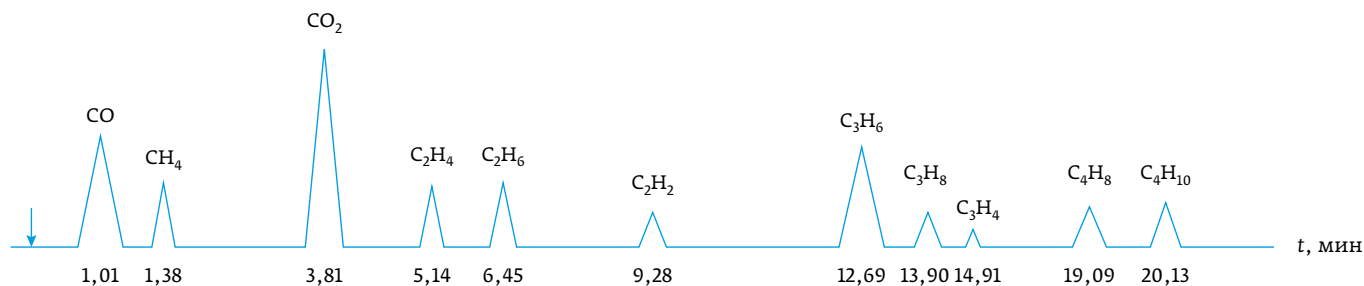


Рис. 2. Отбор жидкого диэлектрика на хроматографический анализ

СаА длиной 2 м (колонка М 2 м × 3 мм СаА 0,2/0,4 мм). Детектирование паро-газовой фазы, разделяемой на двух первых последовательно соединенных колонках, проводили на пламенно-ионизационном детекторе (ПИД), а разделяемой на колонке с молекулярными ситами СаА – с помощью детектора по теплопроводности (ДТП). Хроматографирование газовой фазы осуществлялось параллельно на двух детекторах. При анализе использовался программируемый режим работы термостата колонок (рис. 3). Длительность анализа составляла 40 мин: на первых 20 мин происходит детектирование целевых газовых компонентов, последующие 20 мин необходимы для контроля чистоты колонок после анализа. Количественный расчет концентрации индивидуальных газов проводился методом абсолютной градуировки, построенной с использованием аттестованной смеси газов (водород –  $\text{H}_2$ , кислород –  $\text{O}_2$ , азот –  $\text{N}_2$ , метан –  $\text{CH}_4$ , ацетилен –  $\text{C}_2\text{H}_2$ , этилен –  $\text{C}_2\text{H}_4$ , этан –  $\text{C}_2\text{H}_6$ , пропилен –  $\text{C}_3\text{H}_6$ , пропан –  $\text{C}_3\text{H}_8$ , метилацетилен –  $\text{C}_3\text{H}_4$ , бутен-1 –  $\text{C}_4\text{H}_8$ , н-бутан –  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , окись углерода –  $\text{CO}$ , двуокись углерода –  $\text{CO}_2$ ), растворенных в аргоне. Порядок выхода компонентов на хроматограмме приведен на рис. 3.



Режим работы термостата колонок



ПВД

Рис. 3. Хроматограмма газов, идентифицируемых в равновесной парогазовой фазе над диэлектрической жидкостью (стилизованно)

## Результаты исследований и их обсуждение

На диаграммах (рис. 4–7) отражены результаты по хроматографическому определению газов, растворенных в изоляционных жидкостях после электрического воздействия в разрезе: содержание водорода H<sub>2</sub> (рис. 4); сумма углеводородных газов (метан CH<sub>4</sub>, этан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, этилен C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, ацетилен C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, пропан C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, пропилен C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, метилацетилен C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>, н-бутан C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, бутен-1 C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>) (рис. 5); концентрация оксида углерода CO (рис. 6); концентрация диоксида углерода CO<sub>2</sub> (рис. 7).

Воздействие разрядных процессов в модельных условиях, приводит к образованию небольшого количества водорода во всех жидкостях – масло, эфир и их смеси (от 4,9 ррп до 8,3 ррп). В наибольшем количестве генерируются углеводородные газы (от 57 до 139 ррп). В трансформаторном масле во время разрядных процессов в больших количествах синтезируются оксид (131 ррп) и диоксид углерода (1490 ррп). В целом тенденция газообразования следующая: с увеличением доли синтетического эфира в смеси с трансформаторным маслом под влиянием разрядных процессов

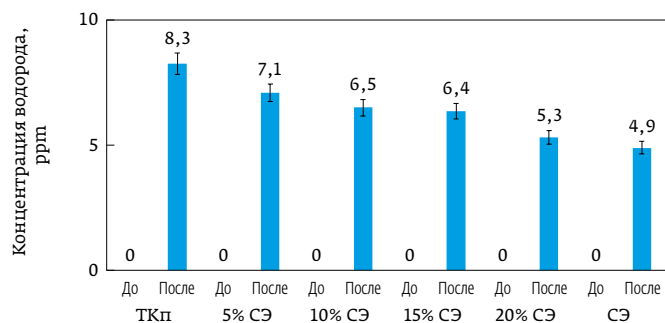


Рис. 4. Образование водорода (H<sub>2</sub>) в жидкостях до и после разрядных процессов

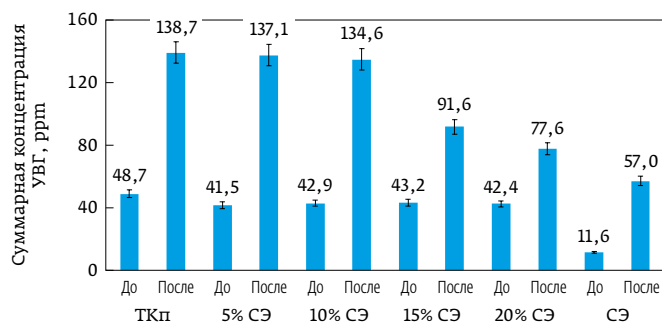


Рис. 5. Образование углеводородных газов (УВГ) в жидкостях до и после разрядных процессов

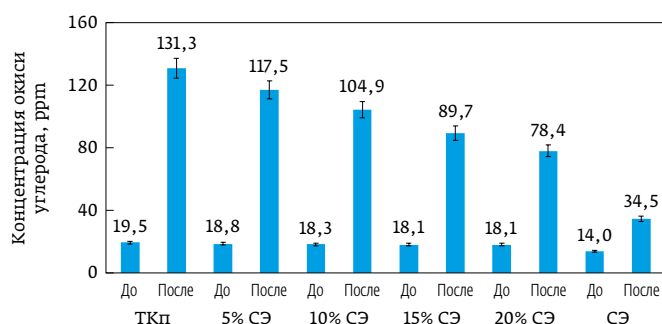


Рис. 6. Образование оксида углерода (CO) в жидкостях до и после разрядных процессов

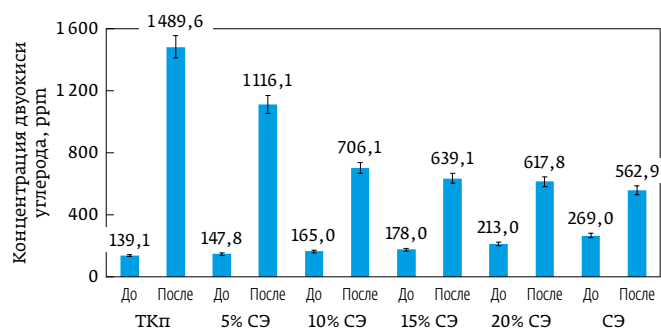


Рис. 7. Образование диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) в жидкостях до и после разрядных процессов

образование газов заметно снижается. Так, общее содержание газов (водород H<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub>, этан C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, этилен C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, ацетилен C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, пропан C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, пропилен C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, метилацетилен C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>, бутан C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, бутен C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>, оксид углерода CO, диоксид углерода CO<sub>2</sub>) в трансформаторном масле после воздействия разрядов составило 1768 ppm. В смесях с объемной долей эфира 20% (827 ppm) и 30% (779 ppm) общее количество газов под влиянием разрядов образовалось почти на 50% меньше, чем в масле. Вероятнее всего, это связано с тем, что основными компонентами диэлектрической жидкости Midel 7131 являются эфиры пентаэритрита и жирных карбоновых кислот от C<sub>5</sub> до C<sub>22</sub>. Молекулы синтетического эфира имеют пространственно-затрудненную структуру. Такой тип структуры молекул за счет образования внутри- и межмолекулярных водородных связей обеспечивает эфиру уникальные свойства – высокую термическую стабильность и низкую испаряемость [25].

В целом, результаты, приведенные в настоящей работе, получены в условиях физического моделирования разрядных процессов, действовавших определенное время на жидкости, и дают некоторое представление о разложении жидкостей под воздействием электрических разрядов. Кроме того, в эксплуатации силовых трансформаторов отбор проб масла на физико-химический анализ производится через специальные штуцеры, расположенные в нижней или верхней части бака. Поэтому с практической точки зрения интересным будет изучение качественного и количественного состава газов, выделяющихся в эксплуатационных трансформаторах, заполненных смесями жидких диэлектриков (масла и синтетического сложного эфира). Следовательно, работы в данном направлении будут продолжены.

## Заключение

С помощью предложенной методики хроматографического определения газов проведено исследование образования газов после воздействия разрядов в трансформаторном масле и синтетической сложноэфирной диэлектрической жидкости Midel 7131, а также их смесях с объемной долей сложноэфирной жидкости от 5 до 30%. Установлено, что после воздействия разрядных процессов генерируются газы, такие как водород, углеводороды состава C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> и C<sub>4</sub>, оксид и диоксид углерода. При этом в наибольшем количестве они образуются в самом трансформаторном масле. С увеличением доли синтетического эфира в смеси с трансформаторным маслом под влиянием разрядных процессов образование газов снижается на 22–55% по сравнению с чистым трансформаторным маслом.

Методика, опробованная в данном эксперименте, базируется на традиционной газовой хроматографии и позволяет без особых технических и финансовых затрат проводить определение большего количества газов (в дополнение к H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, проводить количественное определение углеводородных газов состава C<sub>3</sub> и C<sub>4</sub>), растворенных в диэлектрических жидкостях, а значит понимать разложение жидкого диэлектрика на начальных этапах возникновения дефекта внутри дорогостоящего высоковольтного трансформатора. Внедрение расширенной газохроматографической методики (определения содержания 14 газовых компонентов в диэлектрической жидкости вместо 9) в ежедневную лабораторную практику электросетевых лабораторий имеет большое практическое значение для превентивной диагностики высоковольтного оборудования, имеющего изоляционную систему «жидкий диэлектрик – целлюлоза».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10198).

## Литература / References

1. Korobeynikov S. M., Ovsyannikov A. G., Ridel A. V., Karpov D. I., Lyutikova M. N., Kuznetsova Yu. A., Yassiniski V. B. Study of partial discharges in liquids. *Journal of Electrostatics*. 2020. 103: Article 103412.
2. Korobeynikov S. M., Ridel A. V., Karpov D. I., Meredova M. B., Ovsyannikov A. G. Partial discharges in free helium bubbles in transformer oil. *ICHVE 2018-2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 2019. Paper 8642061.
3. Korobeynikov S., Ridel A., Lyutikova M. Experimental studies of partial discharges in bubbles exposed to X-ray radiation. *IEEE 22<sup>nd</sup> International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials*. EDM 2021. 2021:251-254.
4. Son E. E., Tyufityaev A. S., Gadzhiev M. Kh., Kulikov Y. M., Panov V. A., Akimov P. L. Electrical Breakdown Voltage of Transformer Oil with Gas Bubbles. *High Temperature*. 2014. 52(5):770-773.
5. Гаджиев М. Х., Тюфтяев А. С., Акимов П. Л., Саргсян М. А., Демиров Н. А. Исследование электрического пробоя двухфазной смеси трансформаторного масла с пузырьками газа. *Прикладная Физика*. 2016. 5:10-15.  
Gadzhiev M. Kh., Tyufityaev A. S., Akimov P. L., Sargsyan M. A., Demirov N. A. Investigation of electrical breakdown of a two-phase mixture of transformer oil with gas bubbles. *Applied Physics*. 2016. 5:10-15.
6. Korobeynikov S. M., Ridel A. V., Karpov D. I., Ovsyannikov A. G. Mechanism of partial discharges in free helium bubbles in transformer oil. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2019. 26(5):1605-1611.
7. Ридель А. В. Исследование электрофизических процессов в жидкой электрической изоляции с микровключениями: дисс. ... канд. технич. наук: 05.14.12. Новосибирск, 2021. 136 с.  
Ridel A. V. Research of electrophysical processes in liquid electrical insulation with microinclusions: diss. ... cand. tech. Sciences: 05.14.12. Novosibirsk, 2021. 136 p.
8. Коробейников С. М., Ридель А. В. Сравнение коэффициентов газообразования при частичных разрядах в системе «острие-плоскость» в рапсовом и трансформаторном маслах. *Прикладная физика*. 2018. 6:25-28.  
Korobeinikov S. M., Ridel A. V. Comparison of gas generation coefficients for partial discharges in the "point-plane" system in rapeseed and transformer oils. *Applied Physics*. 2018. 6:25-28.
9. РД 153-34.0-46.302-00. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. РАО «ЕЭС РОССИИ», М.: Технонорматив, 2011. 30 с.  
RD 153-34.0-46.302-00. Guidelines for the diagnosis of developing defects in transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil. RAO UES of RUSSIA. Moscow. Tekhnormativ Publ., 2011. 30 p.
10. СТО 34.01-23-003-2019. Методические указания по техническому диагностированию развивающихся дефектов маслонаполненного высоковольтного электрооборудования по результатам анализа газов, растворенных в минеральном трансформаторном масле. ПАО «Россети». М., 2019. 63 с.  
STO 34.01-23-003-2019. Guidelines for the technical diagnosis of developing defects in oil-filled high-voltage electrical equipment based on the results of the analysis of gases dissolved in mineral transformer oil. PJSC Rosseti, Moscow, 2019. 63 p.
11. IEEE Standard C57.104-2008 IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, 2009. 36 p.
12. Chen W., Peng S., Li J. Canonical correlation between partial discharges and gas formation in transformer oil paper insulation. *Energies*. 2012. 5:1081-1097.
13. Rozga P., Beroual A., Przybylek P., Jaroszewski M., Strzelecki K. A Review on Synthetic Ester Liquids for Transformer Applications. *Energies*. 2020. 13. Article 6429.
14. Loisselle L., Mohan Rao U., Fofana I. Gassing Tendency of Fresh and Aged Mineral Oil and Ester Fluids under Electrical and Thermal Fault Conditions. *Energies*. 2020. 13. Article 3472.
15. Przybylek P., Gielniak J. Concentration analysis of gases formed in mineral oil, natural ester and synthetic ester by discharges of high energy. *Eksploracja Niezawodnos-Maintenance Rel.* 2018. 20(3):435-442.
16. Патент РФ № RU2751460C1. Способ хроматографического анализа газов, растворенных в трансформаторном масле. Коробейников С. М., Лютикова М. Н., Ридель А. В. Заявка № 2020140031 от 07.12.2020. Опубликовано 14.07.2021 Бюл. № 20.  
RF patent No. RU2751460C1. Method for chromatographic analysis of gases dissolved in transformer oil. Korobeinikov S. M., Lyutikova M. N., Ridel A. V. Application No. 2020140031 dated 12.07.2020. Posted on 14.07.2021 Bull. No. 20.
17. CIRGE Brochure 436. Experiences in Service with New Insulating Liquids. Working Group A2.35. 2010. 95 p.
18. MIDEЛ 7131. Синтетическая диэлектрическая трансформаторная жидкость. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL-7131-Product-Brochure.pdf> (Дата обращения: 14.02.2023).  
MIDEL 7131. Synthetic dielectric transformer liquid.
19. Lyutikova M., Korobeinikov S., Kononov A. Evaluation of the Properties of Mixture of Aromatic Mineral Oil and Synthetic Ester for High-Voltage Equipment. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2021. 28(4):1282-1290.
20. Lyutikova M., Kononov A., Korobeynikov S. Changing of the insulating characteristics of mixtures (mineral oil and synthetic ester) during prolonged exposure of elevated temperature. *49<sup>th</sup> session CIGRE*. 2022. Paper D1-10607.
21. ГОСТ Р МЭК 60814-2013. Жидкости изоляционные. Бумага и прессованный картон, пропитанные маслом. Определение содержания воды автоматическим кулонометрическим титрованием по Карлу Фишеру. М.: Стандартиформ, 2014. 20 с.  
GOST R IEC 60814-2013. Insulating liquids. Paper and pressed cardboard impregnated with oil. Determination of water content by automatic coulometric Karl Fischer titration. Moscow. Standartinform Publ., 2014. 20 p.
22. ГОСТ 17216-2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. М.: Стандартиформ, 2008. 11 с.  
GOST 17216-2001. Industrial cleanliness. Liquid purity classes. Moscow. Standartinform Publ., 2008. 11 p.
23. РД 34.46.303-98. Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. М.: РАО «ЕЭС России», 1998. 31 с.  
RD 34.46.303-98. Guidelines for the preparation and conduct of chromatographic analysis of gases dissolved in oil of power transformers. Moscow. RAO UES of Russia, 1998. 31 p.
24. ГОСТ Р МЭК 60156-2013. Жидкости изоляционные. Определение напряжения пробоя на промышленной частоте. М.: Стандартиформ, 2014. 12 с.  
GOST R IEC 60156-2013. Insulating liquids. Determination of breakdown voltage at industrial frequency. Moscow. Standartinform Publ., 2014. 12 p.
25. Тонконогов Б. П., Попова К. А., Хурумова А. Ф. Перспективы применения сложных эфиров отечественного производства в качестве основ масел для авиационной техники. Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2015. 1(278):109-120.  
Tonkonogov B. P., Popova K. A., Khurumova A. F. Prospects for the use of domestically produced esters as the bases of oils for aviation equipment. Proceedings of the Russian State University of Oil and Gas named I. M. Gubkin. 2015. 1(278):109-120.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023  
Принята к публикации 08.06.2023

**ПРИГЛАШАЕМ  
К УЧАСТИЮ**

Место проведения:  
площадка у ТЦ «Мой Порт»,  
ул. Кирова, 146, мобильный павильон

# ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ 19-21 СЕНТЯБРЯ

БОЛЕЕ 28 ЛЕТ ВЫСТАВКАМ • 7000 ПОСЕТИТЕЛЕЙ-СПЕЦИАЛИСТОВ

**Ижевск' 2023**

## ТЕМАТИКА:

- Металлообрабатывающее оборудование. Инструмент.Metalлопродукция
- Комплектующие изделия и материалы
- Оборудование для термообработки
- Электрические машины и оборудование
- Подъемно-транспортное и складское оборудование
- Литейное оборудование
- Сварочное оборудование
- Контрольно-измерительные приборы и средства автоматизации процессов
- Добыча, переработка, сбыт нефти и газа
- Техника и технологии для добычи нефти и газа, нефтепереработки и нефтехимии. Транспортировка и хранение нефти, нефтепродуктов и газа
- Нефтегазопромысловая геология и геофизика
- Энергетическое и электротехническое оборудование
- Охрана труда, безопасность на производстве. СИЗ
- Ресурсосберегающие технологии
- Сырье, химические материалы, применяемые в нефтегазовой и нефтехимической промышленности
- Средства пожарной безопасности, системы охраны, промышленной безопасности



18+

