

DOI: 10.18721/JEST.24412  
УДК 621.314.212: 621.315.61

*М.Н. Лютикова<sup>1</sup>, С.В. Нехорошев<sup>2</sup>, М.Г. Кульков<sup>3</sup>*

1 – ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы», г. Ноябрьск, Россия

2 – Ханты-Мансийская государственная медицинская академия, г. Ханты-Мансийск, Россия

3 – Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия

## **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДОМ ХРОМАТО-МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ**

Превентивная диагностика состояния внутренней изоляции высоковольтного оборудования имеет большое значение для своевременного обнаружения дефектов и принятия правильного решения по их устранению. Одним из главных компонентов изоляции является трансформаторные масла разных марок. В статье приведен обзор по химическому составу минеральных изоляционных масел, установленному разными учеными мира. Представлены результаты изучения продуктов старения трансформаторных масел наиболее применяемых марок (ГК, ТКп, Т-750, Nytro 11GX, Nytro 10X) в процессе их эксплуатации в реальных условиях работы электросетевого оборудования. Методом газовой хроматографии с масс-селективным детектированием идентифицированы кислородсодержащие соединения, насыщенные углеводороды, предельные и непредельные карбоциклические углеводороды, а также производные рядов нафталина, антрацена. Дано объяснение их происхождения. Обращено внимание на то, что некоторые соединения жидких минеральных диэлектриков могут служить для высоковольтного оборудования индикаторами состояния изоляционной системы «масло – целлюлоза».

*Ключевые слова:* минеральное изоляционное масло, окисление углеводородов, старение масла, газовая хроматография с масс-селективным детектором.

*Ссылка при цитировании:*

М.Н. Лютикова, С.В. Нехорошев, М.Г. Кульков. 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.

*M.N. Lyutikova<sup>1</sup>, S.V. Nekhoroshev<sup>2</sup>, M.G. Kulkov<sup>3</sup>*

1 – Federal grid company of Unified energy system, Noyabrsk, Russia

2 – Khanty-Mansiysk state medical academy, Khanty-Mansiysk, Russia

3 – Yugorsk state university, Khanty-Mansiysk, Russia

## **DIAGNOSTICS OF INTERNAL ISOLATION IN HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT BY CHROMATOGRAPHY AND MASS SPECTROMETRY**

Currently, preventive diagnostics of internal isolation in high-voltage equipment is of great importance for timely detection of defects and making the right decision to eliminate them. One of the main components of insulation are transformer oils of different brands. The article gives an overview of the chemical composition of mineral insulating oils established by various studies. In this paper, we present the results of studying the aging products of the most used brands of transformer oils (GK, ТКп, Т-750, Nytro 11GX, Nytro 10X)

used in real operating conditions of electric grid equipment. Oxygen-containing compounds, saturated hydrocarbons, saturated and unsaturated carbocyclic hydrocarbons, as well as derivatives of naphthalene and anthracene series were identified by gas chromatography with mass-selective detection. An explanation of their origin is given. Attention is drawn to the fact that some compounds of liquid mineral dielectrics can be indicators for assessing the state of the «oil-cellulose» insulation system in high-voltage equipment.

*Keywords:* mineral insulating oil, hydrocarbon oxidation, oil aging, gas chromatography with mass-selective detector.

*Citation:*

M.N. Lyutikova, S.V. Nekhoroshev, M.G. Kulkov, Diagnostics of internal isolation in high-voltage equipment by chromatography and mass spectrometry, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(04)(2018) 118–131, DOI: 10.18721/JEST.24412.

### Введение

Более 100 лет минеральное изоляционное масло является наиболее распространенной изоляционной жидкостью, выполняющей в высоковольтном оборудовании роль диэлектрика, охлаждения, защиты, а в последнее время и информационно-диагностической среды [1, 2]. Минеральные масла разных марок, как продукт переработки нефти (очищенная нефтяная фракция, выкипающая при температурах около 300–400 °С), имеют очень сложный компонентный состав, который зависит от месторождения нефти, способа получения и очистки нефтепродукта. Существенный вклад в изучение химического состава масел внесли советские и зарубежные ученые: Л.Г. Гуревич, Н.И. Черножуков, С.Е. Крейн, С.Р. Сергиенко, П.А. Санина, А.Б. Виппер, Р.А. Липштейн, М.И. Шахнович, Ватерман, Россини, Мэйер, Липкин и др.

Изоляционное масло представляет собой многогранную систему соединений различного строения. Насыщенные углеводороды, которые подразделяются на парафиновые (алканы) и нафтеновые (циклопарафиновые), составляют основную его часть по массе (до 95 %). Ароматические углеводороды, содержащие одно или несколько ароматических ядер, также входят в обязательные составляющие минерального дистиллята. Методами УФ-, ИК- и масс-спектрологии установлено, что ароматические углеводороды представлены преимущественно

смешанными структурами, соединенными с нафтеновыми кольцами и алкильными цепями. В зависимости от способа очистки трансформаторных масел их углеводородный молекулярный состав дополняется неуглеводородными компонентами (гетероатомными соединениями), в число которых входят асфальтосмолистые вещества (1,0–2,5 %), кислород и азот (0,1 %), сернистые компоненты (0,6–0,7 %), азотсодержащие органические соединения (до 0,8 %), нафтеновые кислоты (до 0,02 %), кислородсодержащие компоненты и соединения, содержащие металлы ( $10^{-3}$ – $10^{-5}$  %). Асфальтосмолистые соединения классифицируют на нейтральные смолы, асфальтены, карбены, асфальтогеновые кислоты и их ангидриды, многие из которых имеют в своем составе полициклические ароматические структуры. Основными классами сернистых соединений масла являются меркаптаны (тиолы), сульфиды (тиаалканы), дисульфиды (дитиаалканы), тиофены. Гетероциклические азотистые соединения в разных маслах встречаются в виде алкил-, циклоалкил- и арилпроизводных пиррола, индола, карбазола, бензокарбазола и иных их типов. Из кислородсодержащих веществ, помимо нафтеновых кислот, масла могут содержать в небольших количествах кислоты жирноароматического ряда. Часть кислорода находится в фенольных соединениях. Могут присутствовать сложные эфиры, спирты, кетоны, а также перекисные соединения. Установлено, что металлоорганические вещества изоляционных

масел представляют собой соли органических кислот и другие комплексные соединения, в частности соли железа, меди, германия [3–7].

В процессе работы высоковольтного оборудования на изоляционное масло воздействуют электрические, магнитные и акустические поля, электрические разряды, тепловые поля. В результате комплекса жестких условий запускается радикально-цепной механизм окисления углеводородов и других соединений масла. При этом молекулярный состав жидкого диэлектрика сильно изменяется, что нежелательно, так как могут образоваться соединения, снижающие его электроизоляционные качества [7–15].

Изучению продуктов окисленных соединений трансформаторного масла посвящено немного работ. Основные результаты изложены советскими исследователями Н.И. Черножуковым, С.Е. Крейном, Р.А. Липштейном, М.И. Шахновичем, М.А. Григорьевым, Л.А. Кондаковым, К.И. Ивановым. Разносторонние эксперименты позволили установить наличие в масле разного класса соединений: перекисных соединений, карбоновых кислот, спиртов, фенолов, альдегидов, кетонов и эфиросодержащих веществ. Н.И. Черножуковым и С.Н. Обрядчиковым идентифицированы муравьиная, уксусная, пропионовая, масляная кислоты [6]. К.И. Ивановым определены окси- и кетокислоты, являющиеся компонентами окисленных «старых» масел [16]. Высокомолекулярные карбоновые кислоты представляют собой смесь различных органических кислот разного молекулярного веса. В составе «глубоко состаренных» масел обнаружены вода, углекислый газ, летучие кислоты ( $H_2S$ ,  $H_2CO_3$ ) и оксиды ( $SO_2$ ) [3]. Органические соли (мыла) меди и железа были определены авторами работы [17] среди продуктов окисления трансформаторных масел. Если говорить об азотсодержащих соединениях, то можно отметить преобладание алкил-, циклоалкил- и арилпроизводных пиридина и хинолина. Из серосодержащих соединений более или менее

идентифицированы алкилбензотиофен и тиенилфенилалкан [5].

Таким образом, в известных литературных источниках компонентный состав масел в основном представлен в виде отдельных групп и классов соединений (за исключением н-парафиновых и некоторых других углеводородов). Обусловлено это сложностью разделения масляной смеси и выделения из нее индивидуальных веществ, поскольку трансформаторные масла представляют собой высококипящие углеводородные фракции перегонки нефти. Кроме того, пик исследований химического состава нефти и продуктов ее переработки, включая масляные дистилляты, приходится на 50–80-е года прошлого столетия, когда развитие инструментальных методов только набирало обороты. В настоящее время методы хроматографического анализа позволяют решать многие непростые задачи. С помощью хромато-масс-спектрометрии и библиотеки масс-спектров существует возможность отслеживания продуктов термохимического и электрического старения изоляционных масел, особенно в эксплуатации. Контроль состояния масла в процессе эксплуатации имеет чрезвычайно важное значение, поскольку помогает предпринять своевременные действия по очистке жидкого диэлектрика от «опасных» окисленных соединений, образующих осадки, которые представляют угрозу активным частям электрооборудования (таким, как обмотки, магнитопровод, отводы, шины, масляные каналы), поскольку ухудшают отвод тепла, вызывают коррозию металлических деталей. Основные задачи физико-химического контроля – постоянное диагностирование состояния изоляционной системы «трансформаторное масло – целлюлоза» и, как следствие, предупреждение аварии (серьезное технологическое нарушение) силового оборудования.

**Цель исследования** – опробование высокочувствительного инструментального метода в задачах диагностирования состояния изоляци-

онной системы «масло — целлюлоза» в высоковольтном электрооборудовании сетевых энергетических предприятий.

### Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования выбраны марки трансформаторных масел, наиболее часто используемые в электросетевом высоковольтном маслonaполненном оборудовании, а именно трансформаторное масло марки ГК (из бака силового трансформатора с герметичной пленочной защитой, в эксплуатации более 25 лет); ТКп (из бака силового трансформатора без специальной защиты, бывшее в эксплуатации более 25 лет); Т-750 (из высоковольтного ввода в герметичном исполнении; в эксплуатации более 25 лет); Nytro 11GX и Nytro 10X (из баков силовых трансформаторов с герметичной пленочной защитой; в эксплуатации 10 лет).

Подготовка проб масла к ГХ-МС анализу проводилась методом жидкость-жидкостной экстракции. В качестве экстрагентов были использованы этанол с объемной долей спирта 96 % и ацетонитрил, предварительно осушенные пропусканием через слой активированного силикагеля марки КСКГ. Пробоподготовка заключалась в экстрагировании присадки из масла экстрагентом в соотношении «растворитель: масло» — 2:2 (2 мл масла + 2 мл экстрагента). Затем смесь перемешивалась в течение 2 мин. С помощью центрифугирования на режимах 5 минут и 3000 об/мин. проводилось разделение пробы на фазы. Верхний слой (экстракт) подвергался хроматографированию. Объем пробы экстракта, вводимой в инжектор хроматографа, — 2 мкл.

Средством измерения служил газовый хроматограф с квадрупольным масс-селективным детектором Perkin Elmer Clarus 500 MS, на котором снимали хроматограммы и масс-спектры соединений экстрактов проб масел. Масс-спектрометр: энергия ионизации 70 эВ, диапазон развертки 10–450 Да; скорость развертки 3 скана/сек. Хроматограф: ГЖХ; колонка Solgel-WAX ( $L = 60$  м,  $d = 0,32$  мм). Толщина

плёнки неподвижной фазы 0,25 мкм. Программирование режима температур термостата от 50 до 200 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин. Температура испарителя — 270 °С. Подвижная фаза — гелий (расход — 0,5 мл/мин).

Соединения, обнаруженные в анализируемых образцах, идентифицировали по библиотечным масс-спектрам (NIST 98, 2008, AMDIS) и литературным данным [18, 19]. В работе представлены соединения, масс-спектры которых совпадают с библиотечными не менее, чем на 85 %. Качественное определение метанола (по времени удерживания) проводили с помощью стандарта. В качестве примера на рис. 1 приведена типичная хроматограмма ацетонитрильно-го экстракта масла марки Т-750.

### Обсуждение результатов

Во всех пробах жидкого диэлектрика обнаружены низкомолекулярные кислородсодержащие соединения 1–7 (см. таблицу). Образование карбонилсодержащих компонентов и карбоновых кислот в маслах (согласно перекисной теории автоокисления А.Н. Баха и К. Энглера, а также радикально-цепного механизма окисления УВ, разработанного Н.Н. Семеновым) свидетельствует об окончании индукционного периода, в течение которого не наблюдается существенных изменений качества изоляционного масла [20]. Однако после индукционного периода, когда произошло накопление активных молекул — «центров окисления» (альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты, спирты), запускаются реакции самоускорения. В результате таких превращений образуется широкий спектр новых соединений. Фитол (9) — алифатический спирт, содержащий неопределенную связь в положении 2, обнаружен преимущественно в маслах марки ГК, ТКп, Т-750. В этих же образцах найдено соединение 8. Спиртосодержащие соединения образуются, главным образом, при продолжительном термическом воздействии на изоляционное масло [4]. В разных соотношениях в пробах масел по масс-

спектрам идентифицированы вещества 11–16, указывающие на протекание реакций глубокого окисления разветвленной структуры парафиновой цепи УВ (через образование окислительных продуктов их поликонденсации), а также ароматической части масла. Особенно следует выделить такие структуры соединений, как 2,4-ди-*трет*-бутилфенол (11) и 3,5-ди-*трет*-бутил-4-гидроксibenзальдегид (14), которые, вероятно, являются промежуточными продуктами окисления ингибирующей присадки 2,6-ди-*трет*-бутил-4-метилфенол (ионол), вводимой в жидкий диэлектрик в обязательном порядке. Углеводороды с прямой или разветвленной цепью (соединения 17–28) являются обязательной составной частью масляных дистиллятов и обнаружены во всех проанализированных образцах трансформаторных масел. В пробах масел ГК, Nytro 11GX и Nytro 10X хромато-масс-спектрометрический анализ показал преимущественное содержание предельных карбоциклических углеводородов (29–31), моно- и полициклических нафтенов (32–35), полициклических углеводородов (36–39). В окисленном изоляционном масле есть та часть углеводородов, которая не подвергается разного рода воздействиям. Поэтому перечисленные соединения могут изначально содержаться в маслах, но не исключено, что часть соединений – это продукты реакций полимеризации и поликонденсации углеводородов, протекающих при высоком напряжении электрического поля и повышенной температуре в баке силового трансформатора. Ароматические структуры с различными боковыми цепями (40–50) в основном найдены в образцах масел ТКп и Т-750. Такие соединения могут быть как продуктами поликонденсации альдегидов, окси- и кетониксидов при высоких температурах жидкой изоляционной среды в совокупности с малой концентрацией кислорода, так и «нормальными» молекулярными составляющими масляных дистиллятов нефти. Последнее подтверждается работой [4]. В высококипящих фракциях нефти

Н.И. Черножуковым найдены гомологи нафталина, фенантрена, антрацена, а также полициклические ароматические УВ с неконденсированными кольцами, среди которых дифенил, дифенилметан, трифенилметан.

Некоторые соединения, идентифицированные с помощью ГХ-МС метода, могут служить в качестве определенных сигналов – маркеров при диагностике высоковольтного маслонаполненного оборудования. В частности, появление метанола в среде масла указывает на термоокислительную деструкцию твердой целлюлозной изоляции. В состав технической целлюлозы входят молекулы целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Целлюлоза – полисахарид, макромолекулы которого построены из мономерных звеньев ангидро-β-D-глюкопиранозы, соединенных гликозидными связями 1 → 4 (1,4-β-гликозидные связи) [21]. Авторы [22–26] выдвинули гипотезу и своими экспериментами подтвердили, что в результате разрыва одной 1,4-β-гликозидной связи целлюлозы образуется одна молекула метанола. При этом образование метанола не зависит от температуры и влагосодержания изоляционной среды, но пропорционально числу разрывов 1,4-β-гликозидных связей. О том, что в твердой изоляции запущен процесс деполимеризации, свидетельствует появление в масле и таких соединений, как фурановые производные (фурфурол (2-FAL), 2-фурилметанол (2-FOL), 5-гидроксиметил-2-фурурол (5-HMF), 5-метил-2-фурурол (5-MEF) и 2-ацетилфуран (2-ACF)), которые образуются только при глубоком старении бумажной изоляции и распределяются в толще масла [27]. Используя эмпирические уравнения и установленные корреляционные связи между образованием фурановых производных и изменением степени полимеризации, оценивают механическую прочность твердой бумажной изоляции и остаточный ресурс. В эксплуатации необходимо отслеживать концентрации веществ-индикаторов.

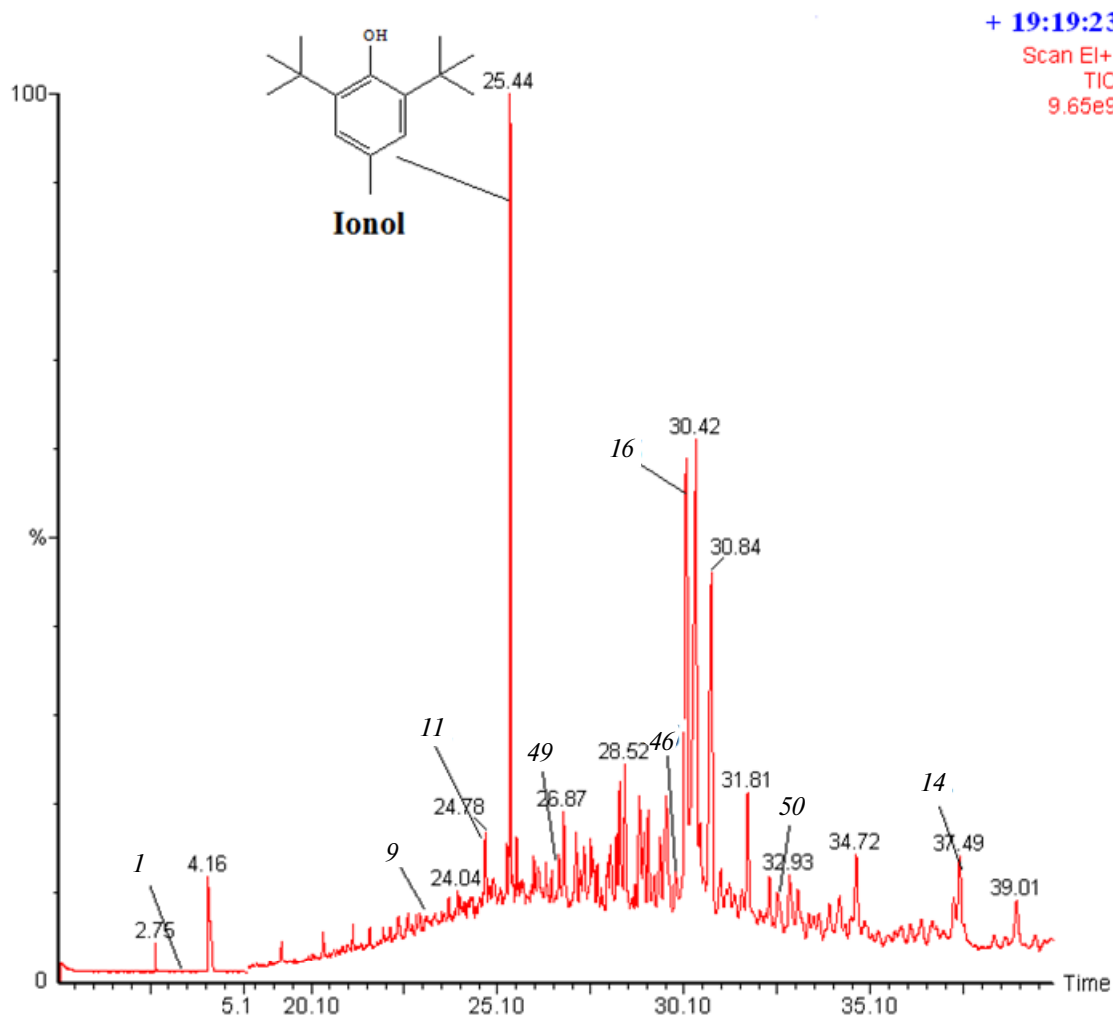


Рис. 1. Пример ГХ/МС-хроматограммы изоляционного масла марки Т-750

Fig. 1. Example GC/MS-chromatogram of insulating oil of T-750 grade

Соединения, идентифицированные в пробах минеральных изоляционных масел, извлеченных из работающего высоковольтного оборудования

Compounds identified in samples of mineral insulating oils from operating high-voltage equipment

№ п/п	Компонент	Брутто- формула	М	Время удержива- ния, мин	Марки масла				
					ГК	ТКП	Т-750	Nyro 11GX	Nyro 10X
<i>Кислородсодержащие соединения</i>									
1	Метанол	CH <sub>5</sub> O	32	3,86	+	+	+	-	-
2	Ацетальдегид	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	44	3,53	+	+	+	+	+
3	Бутанол-1	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74	10,19	+	+	+	+	+
4	Муравьиная кислота	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	46	4,46	+	+	+	+	+
5	Этилформиат	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	74	3,38	+	+	+	+	+
6	Уксусная кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	60	4,77	+	+	+	+	+
7	Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58	3,36	+	+	+	-	-
8	1-гидроксиметил-1,3-диметилциклопентан*	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	128	20,63	+	+	+	-	-
9	Фитол	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O	296	23,41	+	+	+	-	-
10	2-метил-3-(2-пентенил-2-циклопентен)*	C <sub>11</sub> H <sub>18</sub> O	166	16,58	+	+	+	+	+

Окончание таблицы

№ п/п	Компонент	Брутто-формула	М	Время удерживания, мин	Марки масла				
					ГК	ТКП	T-750	Nyro 11GX	Nyro 10X
11	2,4-ди- <i>трет</i> -бутилфенол*	C <sub>14</sub> H <sub>22</sub> O	206	24,79	+	+	+	+	+
12	1-[2,4,6-тригидроксифенил]-1-бутанон*	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>4</sub>	196	28,28	+	+	+	-	-
13	2-метил-3-[4- <i>трет</i> -бутил]фенилпропановая кислота*	C <sub>14</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	220	28,26	+	+	+	-	-
14	3,5-ди- <i>трет</i> -бутил-4-гидроксибензальдегид*	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	234	37,48	+	+	+	+	+
15	4-метилдибензофуран*	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub> O	182	33,24	+	+	+	-	-
16	Дибутилфталат*	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	278	30,09	+	+	+	-	-
<i>Насыщенные углеводороды с прямой или разветвленной цепью</i>									
17	Гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100	2,99	+	+	+	+	+
18	Тридекан	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	184	16,19	+	+	+	+	+
19	Тетрадекан	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198	18,36	+	+	+	+	+
20	Пентадекан	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212	20,16	+	+	+	+	+
21	Гексадекан	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226	21,69	+	+	+	+	+
22	3-метилнонан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142	15,09	+	+	+	+	+
23	4,8-диметилтридекан	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212	18,20	+	+	+	+	+
24	2,6,10-триметилдодекан	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212	16,37	+	+	+	+	+
25	2,6,10-триметилпентадекан	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	254	22,19	+	+	+	+	+
26	2,6-диметилгептадекан	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>	268	15,10	+	+	+	+	+
27	2,6,10,14-тетраметилгексадекан	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	282	24,16	+	+	+	+	+
28	Эйкозан	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	282	25,10	+	+	+	+	+
<i>Предельные карбоциклические углеводороды</i>									
29	1-(циклогексилметил)-2-метил- <i>транс</i> -циклогексан*	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub>	194	16,57	+	-	-	+	+
30	Гептилциклогексан	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>	182	17,93	+	-	-	+	+
31	1-бутил-2-пропил-циклопентан	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>	168	20,04	+	-	-	+	+
<i>Моно- и полициклические нафтенy</i>									
32	1-метилдекагидронафталин*	C <sub>11</sub> H <sub>20</sub>	152	12,03	+	-	-	+	+
33	Декагидро-2,6-диметилнафталин*	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub>	166	14,78	+	-	-	+	+
34	Декагидро-4,4,8,9,10-пентаметилнафталин*	C <sub>15</sub> H <sub>28</sub>	208	20,30	+	+	-	+	+
35	1,1'-метиленебис[декагидро]нафталин*	C <sub>21</sub> H <sub>36</sub>	288	22,19	+	-	-	+	+
<i>Полициклические углеводороды</i>									
36	(3аа, 6аа, 9аа, 6во) – пергидрофенален*	C <sub>14</sub> H <sub>24</sub>	192	22,41	+	-	-	+	+
37	(4аа, 8аа, 9аб, 10аа) – тетрагидроантрацен*	C <sub>14</sub> H <sub>24</sub>	192	21,32	+	-	-	+	+
38	Тетрагидро-1-метилфенантрен*	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub>	206	23,26	+	-	-	+	+
39	Гексадекагидропирен*	C <sub>16</sub> H <sub>26</sub>	218	21,02	+	-	-	+	+
<i>Непредельные карбоциклические углеводороды (с бензольным кольцом)</i>									
40	1-метил-4-(1-метилпропил)-бензен*	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	148	17,78	-	+	+	-	-
41	1,2,3,4-тетраметил-4-(1-метилененил)-бензен*	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	174	24,80	-	+	+	-	-
42	2-(2-бутенил)-1,3,5-триметилбензен*	C <sub>13</sub> H <sub>18</sub>	174	24,61	-	+	+	-	-
43	1,8-диметилнафталин*	C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	156	26,41	+	+	+	-	-
44	2,3,6-триметилнафталин*	C <sub>13</sub> H <sub>14</sub>	170	29,41	-	+	+	-	-
45	1,2,3,4-тетраметилнафталин*	C <sub>14</sub> H <sub>16</sub>	184	32,48	-	+	+	-	-
46	1-метил-7-(1-метилэтил)-нафталин*	C <sub>14</sub> H <sub>16</sub>	184	29,47	-	+	+	-	-
47	2-этилнафталин*	C <sub>12</sub> H <sub>12</sub>	156	26,14	+	+	+	-	-
48	Антрацен*	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178	29,88	-	+	+	-	-
49	Дифенил*	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154	26,62	-	+	+	-	-
50	Флуорен*	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	166	33,03	-	+	+	-	-

Примечание: «+» – соединение обнаружено в образце; «-» – соединение не обнаружено в образце; \* – помечены соединения, для которых на рис. 2 приведены структурные формулы.

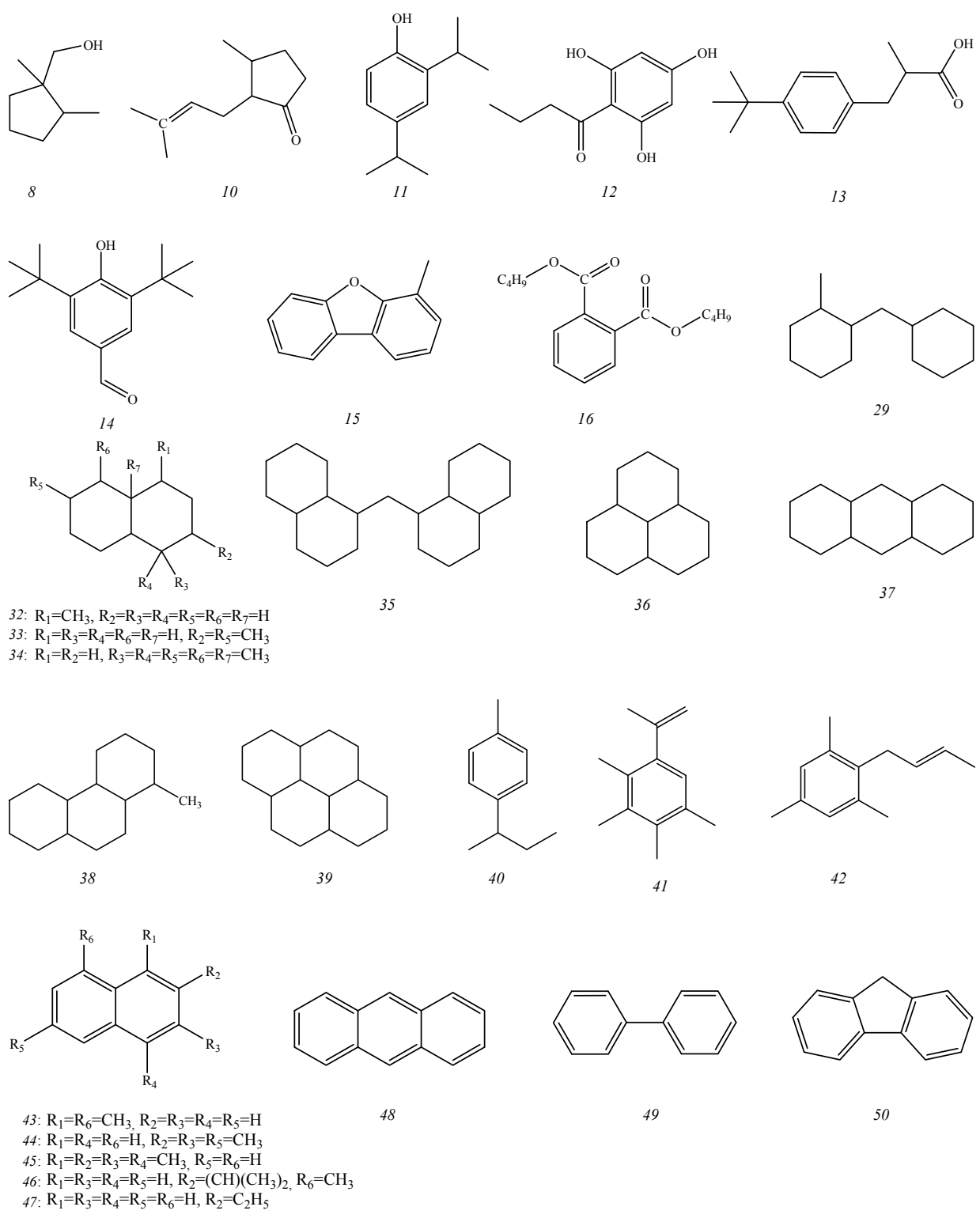


Рис. 2. Структурные формулы некоторых соединений  
Fig. 2. Structural formulas of some connection



Нейтральные соединения сами по себе не представляют опасности в процессе эксплуатации трансформаторного масла (не оказывают заметного влияния на снижение изолирующих и теплоотводящих качеств), образуя с его молекулами истинные растворы. Но стоит понимать, что в работающем высоковольтном оборудовании жидкий диэлектрик подвергается одновременно нескольким факторам воздействия (влага, температура, электрическое поле, металлы и примеси, световая энергия и т. д.), инициирующим и ускоряющим дальнейшее превращение компонентов. Кроме того, эти факторы могут действовать синергично, т. е. взаимно усиливать эффект воздействия в несколько раз. Появляющиеся компоненты в результате различных превращений могут наносить более существенный вред оборудованию. Так, взаимодействуя с элементами конструкции, они ускоряют процесс их износа, что в последующем может привести к серьезному технологическому нарушению [28–39]. Опасность кислородсодержащих соединений, таких, как низкомолекулярные карбоновые кислоты, спирты, карбонильные соединения, состоит в том, что они легко сорбируются главной твердой изоляцией любого силового электрооборудования, образуя с молекулами целлюлозы межмолекулярные и водородные связи, ускоряя ее необратимое старение [3, 30–33]. Под действием электрического поля происходит поляризация нейтральных молекул масла, вследствие чего они приобретают дипольный момент и коагулируются. В свою очередь, коллоиды обладают свойством ионной проводимости, что, в конечном счете, способно вызвать значительное снижение электроизоляционных свойств [29]. Альдегиды и кетоны участвуют в дальнейшем окислении до образования карбоновых кислот, а кроме того, между ними могут протекать реакции конденсации. Последнее приводит к синтезу тяжелых высокомолекулярных веществ, многие из которых не растворимы в масле. Ярким примером

таких соединений являются смолы. Фенолы, спиртосодержащие компоненты и карбоновые кислоты вступают во взаимодействие с металлическими частями энергооборудования, вызывая коррозию стальных элементов и превращаясь в соли, могущие выпадать в осадок [16]. Появление осадков является результатом постоянного контакта масла с компонентами лака обмоток, старого шлама, образования тяжелых нерастворимых в масле лактидов, лактонов, эстолидов, асфальтогеновых кислот, карбоидов, смол, асфальтенов, карбенов и других высокомолекулярных соединений [4]. Концентрирование твердых налетов на активных частях высоковольтных аппаратов приводит к закупориванию охлаждающих масляных каналов и нарушает эффективное охлаждение электрооборудования. Из частиц осадка вполне вероятно образование проводящих мостиков в твердой целлюлозе, снижающих ее электрическую прочность. Следствием комплексных окислительных, термохимических и электрических процессов в системе «масло – целлюлоза» является резкое снижение электрической прочности масла, вероятное появление мощных частичных разрядов и даже возникновение пробоя главной изоляции высоковольтного аппарата, приводящего к выходу его из строя [34].

### Заключение

Таким образом, современные инструментальные методы, в число которых входит хромато-масс-спектрометрия, являются первостепенными помощниками в решении задач предупредительной диагностики – получения своевременной информации о начале и/или развитии дефекта, связанного с ухудшением изоляционных свойств материалов, и принятия мер еще до опасного снижения электрической прочности. Во-первых, используя метод газовой хроматографии с масс-селективным детектором, диагносты получают информацию о количественном содержании каждого от-



дельного соединения из числа входящих в классы кислот, щелочей, фенолов, эфиров и т. д., что более ценно по сравнению с традиционными методами (определение кислотного числа, водорастворимых кислот и щелочей, содержание шлама и др.). Дело в том, что традиционные методы зачастую не помогают понять степень старения жидкого диэлектрика в силу того, что соединения вступают в реакции нейтрализации, и простыми методами титрования или экстракцией получают заниженные результаты. Во-вторых, один метод хромато-масс-спектрометрии может заменить сразу несколько традиционных – определение кислотного числа по ГОСТ 5985-79, водорастворимых кислот и щелочей по ГОСТ 6307-75, общее содержание шлама по СТО 70238424.27.100.053-2013, ароматических углеводородов по ГОСТ 28640-90, антиокислительной присадки по ГОСТ Р МЭК 60666-2013, фурановых производных по ГОСТ Р МЭК 61198-2013. Такая замена, несомненно, приведет к сокращению материальных затрат, связанных с закупкой огромного списка химических реактивов, их утилизацией, доплатами за вредность специалистам химических лабораторий.

В плане диагностики хромато-масс-спектрометрия за один анализ позволяет понять состояние жидкой изоляции изнутри. По

количественному содержанию конкретных «опасных» и «полезных» веществ-маркеров можно понять степень старения минерального изоляционного масла и, кроме того, с большой долей вероятности определить причину, по которой происходит усиленное электрохимическое старение диэлектрика (термический дефект, дефект электрического характера, нарушение герметичности высоковольтного аппарата и т. д.). Но, самое главное, информация о наличии конкретных соединений, особенно «опасных», поможет своевременно провести восстановление электрофизических и теплоотводящих свойств (очистка, регенерация) по эффективной технологии с использованием селективных материалов [35–41]. Поскольку масло постоянно контактирует с целлюлозой, такие профилактические меры предотвратят быстрое старение главной целлюлозной изоляции высоковольтного оборудования, а значит, и серьезные технологические нарушения. В целом такое внимательное отношение с применением современных инструментальных методов к состоянию внутренней изоляции дорогостоящих силовых трансформаторов, высоковольтных вводов и другого маслонаполненного оборудования значительно сократит финансовые затраты за счет продления «жизни» электроаппаратам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шуварин Д.В.** Электроизоляционные, турбинные и промышленные масла // Материалы науч.-практ. конф. «Нефтяные масла в электроэнергетике: актуальные вопросы применения и контроля качества». Москва. 2015. [Электр. ресурс]. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/atc/#oil2015> (дата обращения: 15.08.2018).
2. **Туркот В.А.** Трансформаторное масло как диагностическая среда в высоковольтном оборудовании // Материалы науч.-практ. конф. «Нефтяные масла в электроэнергетике: актуальные вопросы применения и контроля качества». Москва. 2015. [Электр. ресурс]. URL: <http://twf.mpei.ac.ru/atc/#oil2015> (дата обращения: 15.08.2018).
3. **Липштейн Р.А., Шахнович М.И.** Трансформаторное масло. М.: Энергоатомиздат, 1983. 296 с.
4. **Черножуков Н.И., Крейн С.Э., Лосиков Б.В.** Химия минеральных масел. М.: Гостоптехиздат, 1959. 416 с.
5. **Чертков Я.Б.** Неуглеводородные соединения в нефтепродуктах. М.: Химия, 1964. 320 с.
6. **Черножуков Н.И., Крейн С.Э.** Окисляемость минеральных масел. М.: ГНТИНГТЛ, 1955. 371 с.
7. **Чалая О.Н., Лифшиц С.Х., Карелина О.С.** Особенности состава дистиллятных масляных фракций нефти Иреляхского месторождения РС(Я) // Наука и образование. 2013. № 4. С. 57–61.

8. Li H., Zhong L., Yu Q., Mori S., Yamada S. The resistivity of oil and oil-impregnated pressboard varies with temperature and electric field strength // *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2014. Vol. 21. № 4. P. 1851–1856.
9. Гайнуллина Л.Р., Тугубалина В.П., Харлампиди Х.Э. Зависимость диэлектрических характеристик трансформаторного масла от углеводородного состава // *Вестник технологического университета.* 2016. Т. 19. № 14. С. 53–55.
10. Qi B., Zhao X., Li C., Wu H. Transient electric field characteristics in oil-pressboard compsite insulation under voltage polarity reversal // *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2015. Vol. 22. № 4. P. 2148–2155.
11. Zukowski P., Kołtunowicz T.N., Kierczyński K., Subocz J., Szrot M., Gutten M., Sebok M., Jurcik J. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard // *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2015. Vol. 22. № 4. P. 2156–2164.
12. Туранова О.А., Вандюков А.Е., Козлов В.К., Туранов А.Н. Исследование механизма образования осадка в трансформаторном масле марки ГК // *Оптика и спектроскопия.* 2013. Т. 114. № 4. С. 628–631.
13. Ризванова Г.И., Гафиятуллин Л.Г., Гарифуллин М.Ш., Козлов В.К., Туранов А.Н. Особенности старения трансформаторного масла в реальных условиях эксплуатации // *Известия вузов. Проблемы энергетики.* 2015. № 9–10. С. 91–94.
14. Anikeeva M.A., Korobeynikov S.M. Study of stability against oxidation of rapeseed oil // *J. of Engineering Thermophysics.* 2016. Vol. 25. Is. 2. P. 236–238.
15. Обухов А.Е., Чайков Л.Л., Коваленко К.В., Кривохижа С.В., Лобанов А.Н. Метод динамического рассеяния света и комплексная спектральная атомно-молекулярная идентификация структуры коллоидных образований в трансформаторном масле // *Актуальные проблемы нефти и газа.* 2016. Вып. 2(14). [Электр. ресурс] URL: [http://www.oilgasjournal.ru/issue\\_14/obukhov.html](http://www.oilgasjournal.ru/issue_14/obukhov.html) (дата обращения: 20.11.2017).
16. Иванов К.И. Промежуточные продукты и промежуточные реакции автоокисления углеводородов. М.-Л.: Гостоптехиздат, 1949. 192 с.
17. Кузнецов В.Г., Новосартов Г.Т., Горячев В.В., Запорожская О.А., Кунина Е.А., Мышалова А.А. Причины образования осадков в масле Б-3В // *Химия и технология топлив и масел.* 1981. № 11. С. 31–33.
18. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. М.: Бином, 2003. 493 с.
19. Преч Э., Бюльман Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных. М.: Мир, Бином, 2006. 438 с.
20. Семенов Н.Н. Цепные реакции. Л.: Госхимтехиздат, 1934. 555 с.
21. Роговин Э.А., Шорыгина Н.Н. Химия целлюлозы и ее спутников. Ленинград: ГНТИХЛ, 1953. 679 с.
22. Gilbert R., Jalbert J., Tétreault P., Morin B., Lessard-Deziel D. Identification of a chemical indicator of the rupture of 1,4- $\beta$ -glycosidic bonds of cellulose in an oil-impregnated insulating paper system // *Cellulose.* 2007. Vol. 14. Is. 4. P. 295–309.
23. Jalbert J., Lessard M. Cellulose Chemical Markers in Transformer Oil Insulation. Part 1: Temperature Correction Factors // *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2013. Vol. 20. № 6. P. 2287–2291.
24. Rodriguez-Celis E.M., Duchesne S., Jalbert J., Ryadi M. Understanding ethanol versus methanol formation from insulating paper in power transformers // *Cellulose.* 2015. Vol. 22. Is. 5. P. 3225–3236.
25. Jalbert J., Gilbert R., Denos Y., Gervais P. Methanol: A Novel Approach to Power Transformer Asset Management // *IEEE Trans. on Power Delivery.* 2012. Vol. 27. № 2. P. 514–520.
26. Schaut A., Eeckhoudt S. Identification of early-stage paper degradation by methanol // *Proc. of 44th CIGRE Session. Paris.* 2012. Paper A2-107.
27. Ramazani A., Rahmati R., Bigdeli S., Rahmani S., Hamidi M. Aging study of transformer oil-impregnated repulped and standard cellulose by measuring of 2-furfural content of the oil // *J. of Applied Chemical Research.* 2015. Special issue. P. 35–45.
28. Лядов Н.М., Туранова О.А., Козлов В.К., Туранов А.Н. Изучение продуктов старения трансформаторного масла методом сканирующей электронной микроскопии // *Химия и технология топлив и масел.* 2013. № 4. С. 53–56.
29. Turanova O.A., Bikinyayeva Yu.K., Gafiyatullin L.G., Gnezdilov O.I., Kozlov V.K., Turanov A.N. Role of Aromatic Hydrocarbons in Sediment Formation in Transformer Oil // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils.* 2014. Т. 49. № 6. P. 517–521.
30. Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. М.: Энергоиздат, 2004. 616 с.
31. Saruhashi Daisuke, Bin Xiang, Zhiyuan Liu, Yanabu Satoru. Thermal degradation phenomena of flame resistance insulating paper and oils // *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2013. Vol. 20. № 1. P. 122–127.



32. **Sarathi R., Yadav K.S., Swarna M.** Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated press-board material // *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2015. Vol. 33. № 5. P. 2513–2521.
33. **Сви П.М.** Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. М.: Энергия, 1980. 113 с.
34. **Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю., Неклепаев Б.Н., Антипов К.М., Сурба А.С., Чичинский М.И.** О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации // *Электрические станции.* 2001. №9. С. 53–58.
35. **Брай И.В.** Регенерация трансформаторных масел. М.: Химия, 1966. 152 с.
36. **Монастырский А.Е.** Регенерация, сушка и дегазация трансформаторного масла. Санкт-Петербург: Изд-во ПЭИПК, 2002. 40 с.
37. **Laurentino A.C., Parize A.L., Laranjeira M.C.M., Martins A.R., Mayer N.M., De Favere V.T.** Regeneration of Insulating Mineral Oil by Carbonated Amorphous Calcium Phosphate–Chitosan Adsorbent // *Process Safety and Environmental Protection.* 2007. Vol. 5. Is. 4. P. 327–331.
38. **Курмаев Р.Н., Глушанкова И.С., Вайсман Я.И.** Выбор и обоснование метода утилизации отработанных масел на крупных промышленных предприятиях // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология.* 2016. № 1. С. 38–51.
39. **Исханова А.И., Гайнутдинова А.М.** Очистка и регенерация трансформаторного масла // *Научно-практический электронный журнал «Аллея науки».* 2016. № 4. [Электр. ресурс]. URL: <http://www.alley-science.ru> (дата обращения: 20.04.2018).
40. **Долин А.П.** Эксплуатация и техническое обслуживание трансформаторов с длительным сроком службы // *Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность.* 2014. № 5. С. 29–34.
41. **Макарова Л.В., Мышкин Н.К., Макаренко В.М.** Флуоресцентный метод оперативного контроля трансформаторного масла // *Химия и технология топлив и масел.* 2016. № 2. С. 46–50.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЛЮТИКОВА Марина Николаевна** — кандидат химических наук руководитель лаборатории службы диагностики ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы»

E-mail: [m.lyutikova@mail.ru](mailto:m.lyutikova@mail.ru)

**НЕХОРОШЕВ Сергей Викторович** — доктор технических наук ведущий научный сотрудник Ханты-Мансийской государственной медицинской академии

E-mail: [serg-nehor@rambker.ru](mailto:serg-nehor@rambker.ru)

**КУЛЬКОВ Михаил Григорьевич** — ведущий инженер Югорского государственного университета

E-mail: [mgk83@bk.ru](mailto:mgk83@bk.ru)

Дата поступления статьи в редакцию: 02.09.2018

#### REFERENCES

- [1] **Shuvarin D.V.** Elektroizolyatsionnyye, turbinnyye i industrialnyye masla. *Materialy nauch.-prakt. konf. «Neftyanyye masla v elektroenergetike: aktualnyye voprosy primeneniya i kontrolya kachestva».* Moscow, 2015. Available: <http://twf.mpei.ac.ru/atc/#oil2015> (Accessed 15.08.2018). (rus.)
- [2] **Turkot V.A.** Transformatornoye maslo kak diagnosticheskaya sreda v vysokovoltном oborudovanii. *Materials nauch.-pract. Conf. «Petroleum oils in the power industry: current issues of application and quality control».* Moscow, 2015. Available: <http://twf.mpei.ac.ru/atc/#oil2015> (Accessed 15.08.2018). (rus.)
- [3] **Lipshteyn R.A., Shakhnovich M.I.** Transformatornoye maslo. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 296 s. (rus.)
- [4] **Chernozhukov N.I., Kreyn S.E., Losikov B.V.** Khimiya mineralnykh masel. Moscow: Gostoptekhizdat, 1959. 416 s. (rus.)
- [5] **Chertkov Ya.B.** Neuglevodorodnyye soyedineniya v nefteproduktakh. Moscow: Khimiya, 1964. 320 s. (rus.)
- [6] **Chernozhukov N.I., Kreyn S.E.** Okislyayemost mineralnykh masel. Moscow: GNTINGTL, 1955. 371 s. (rus.)

- [7] **Chalaya O.N., Lifshits S.Kh., Karelina O.S.** Osobennosti sostava distillyatnykh maslyanykh fraktsiy nefti Irelyakhskego mestorozhdeniya RS(Ya). *Science and education*. 2013. No 4, pp. 57–61. (rus.)
- [8] **Li H., Zhong L., Yu Q., Mori S., Yamada S.** The resistivity of oil and oil-impregnated pressboard varies with temperature and electric field strength. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2014. Vol. 21. № 4. P. 1851–1856.
- [9] **Gaynullina L.R., Tutubalina V.P., Kharlampidi Kh.E.** Zavisimost dielektricheskikh kharakteristik transformatornogo masla ot uglevodorodnogo sostava. *Bulletin of the Technological University*. 2016. T. 19. № 14. S. 53–55. (rus.)
- [10] **Qi B., Zhao X., Li C., Wu H.** Transient electric field characteristics in oil-pressboard compsite insulation under voltage polarity reversal. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2015. Vol. 22. № 4. P. 2148–2155.
- [11] **Zukowski P., Kołtunowicz T.N., Kierczyński K., Subocz J., Szrot M., Gutten M., Sebok M., Jurcik J.** An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2015. Vol. 22. № 4. P. 2156–2164.
- [12] **Turanova O.A., Vandyukov A.Ye., Kozlov V.K., Turanov A.N.** Issledovaniye mekhanizma obrazovaniya osadka v transformatornom masle marki GK. *Optics and spectroscopy*. 2013. T. 114. № 4. S. 628–631. (rus.)
- [13] **Rizvanova G.I., Gafiyatullin L.G., Garifullin M.Sh., Kozlov V.K., Turanov A.N.** Osobennosti stareniya transformatornogo masla v realnykh usloviyakh ekspluatatsii. *News of universities. Problems of energy*. 2015. № 9–10. S. 91–94. (rus.)
- [14] **Anikeeva M.A., Korobeynikov S.M.** Study of stability against oxidation of rapeseed oil. *J. of Engineering Thermophysics*. 2016. Vol. 25. Is. 2. P. 236–238.
- [15] **Obukhov A.Ye., Chaykov L.L., Kovalenko K.V., Krivokhizha S.V., Lobanov A.N.** Metod dinamicheskogo rasseyaniya sveta i kompleksnaya spektralnaya atomno-molekulyarnaya identifikatsiya struktury kolloidnykh obrazovaniy v transformatornom masle. *Aktualnyye problemy nefti i gaza*. 2016. No 2(14). Available: [http://www.oilgasjournal.ru/issue\\_14/obukhov.html](http://www.oilgasjournal.ru/issue_14/obukhov.html) (Accessed 15.08.2018). (rus.)
- [16] **Ivanov K.I.** Promezhutochnyye produkty i promezhutochnyye reaktzii avtookisleniya uglevodorodov. Moscow-Leningrad: Gostoptekhizdat, 1949. 192 s. (rus.)
- [17] **Kuznetsov V.G., Novosartov G.T., Goryachev V.V., Zaporozhskaya O.A., Kunina Ye.A., Myshalova A.A.** Prichiny obrazovaniya osadkov v masle B-3V. *Chemistry and technology of fuels and oils*. 1981. № 11. S. 31–33. (rus.)
- [18] **Lebedev A.T.** Mass-spektrometriya v organicheskoy khimii. Moscow: Binom, 2003. 493 s. (rus.)
- [19] **Prech E., Byulman F., Affolter K.** Opredeleniye stroyeniya organicheskikh soyedineniy. Tablitsy spektralnykh dannykh. Moscow: Mir, Binom, 2006. 438 s. (rus.)
- [20] **Semenov N.N.** Tsepnyye reaktzii. Leningrad: Goskhimtekhnizdat, 1934. 555 s. (rus.)
- [21] **Rogovin Z.A., Shorygina N.N.** Khimiya tsellyulozy i yeye sputnikov. Leningrad: GNTIKhL, 1953. 679 s. (rus.)
- [22] **Gilbert R., Jalbert J., Tétreault P., Morin B., Lessard-Deziel D.** Identification of a chemical indicator of the rupture of 1,4-β-glycosidic bonds of cellulose in an oil-impregnated insulating paper system. *Cellulose*. 2007. Vol. 14. Is. 4. P. 295–309.
- [23] **Jalbert J., Lessard M.** Cellulose Chemical Markers in Transformer Oil Insulation. Part 1: Temperature Correction Factors. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2013. Vol. 20. № 6. P. 2287–2291.
- [24] **Rodriguez-Celis E.M., Duchesne S., Jalbert J., Ryadi M.** Understanding ethanol versus methanol formation from insulating paper in power transformers. *Cellulose*. 2015. Vol. 22. Is. 5. P. 3225–3236.
- [25] **Jalbert J., Gilbert R., Denos Y., Gervais P.** Methanol: A Novel Approach to Power Transformer Asset Management. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2012. Vol. 27. № 2. P. 514–520.
- [26] **Schaut A., Eeckhoudt S.** Identification of early-stage paper degradation by methanol. *Proc. of 44th CI-GRE Session. Paris*. 2012. Paper A2-107.
- [27] **Ramazani A., Rahmati R., Bigdeli S., Rahmani S., Hamidi M.** Aging study of transformer oil-impregnated repulped and standard cellulose by measuring of 2-furfural content of the oil. *J. of Applied Chemical Research*. 2015. Special issue. P. 35–45.
- [28] **Lyadov N.M., Turanova O.A., Kozlov V.K., Turanov A.N.** Izucheniye produktov stareniya transformatornogo masla metodom skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2013. No 4. S. 53–56. (rus.)
- [29] **Turanova O.A., Bikkinyaeva Yu.K., Gafiyatullin L.G., Gnezdilov O.I., Kozlov V.K., Turanov A.N.** Role of Aromatic Hydrocarbons in Sediment Formation in Transformer Oil. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2014. T. 49. № 6. P. 517–521.
- [30] **Lizunov S.D., Lokhanin A.K.** Silovyye transformatory. Moscow: Energoizdat, 2004. 616 s. (rus.)



- [31] **Saruhashi Daisuke, Bin Xiang, Zhiyuan Liu, Yanabu Satoru.** Thermal degradation phenomena of flame resistance insulating paper and oils. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2013. Vol. 20. № 1. P. 122–127.
- [32] **Sarathi R., Yadav K.S., Swarna M.** Understanding the surface discharge characteristics of thermally aged copper sulphide diffused oil impregnated pressboard material. *IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul.* 2015. Vol. 33. № 5. P. 2513–2521.
- [33] **Svi P.M.** Kontrol izolyatsii oborudovaniya vsokogo napryazheniya. Moscow: Energiya, 1980. 113 s. (rus.)
- [34] **Vanin B.V., Lvov Yu.N., Lvov M.Yu., Neklepavev B.N., Antipov K.M., Surba A.S., Chichinskiy M.I.** O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov napryazheniyem 110–500 kV v ekspluatatsii. *Electric stations.* 2001. No 9. S. 53–58. (rus.)
- [35] **Bray I.V.** Regeneratsiya transformatornykh masel. Moscow: Chemistry, 1966. 152 s. (rus.)
- [36] **Monastyrskiy A.Ye.** Regeneratsiya, sushka i degazatsiya transformatornogo masla. Sankt-Peterburg: Izd-vo PEIPK, 2002. 40 s. (rus.)
- [37] **Laurentino A.C., Parize A.L., Laranjeira M.C.M., Martins A.R., Mayer N.M., De Favere V.T.** Regeneration of Insulating Mineral Oil by Carbonated Amorphous Calcium Phosphate–Chitosan Adsorbent. *Process Safety and Environmental Protection.* 2007. Vol. 5. Is. 4. P. 327–331.
- [38] **Kurmayev R.N., Glushankova I.S., Vaysman Ya.I.** Vybor i obosnovaniye metoda utilizatsii otrabotannykh masel na krupnykh promyshlennykh predpriyatiyakh. *Transport. Transport facilities. Ecology.* 2016. No 1. S. 38–51. (rus.)
- [39] **Iskhanova A.I., Gaynutdinova A.M.** Ochistka i regeneratsiya transformatornogo masla. *Scientific and practical electronic journal «Science alley».* 2016. No 4. Available: <http://www.alley-science.ru> (Accessed: 20.04.2018). (rus.)
- [40] **Dolin A.P.** Ekspluatatsiya i tekhnicheskoye obsluzhivaniye transformatorov s dlitelnyim srokom sluzhby. *Electro. Electrical engineering. Power engineering. Electrotechnical industry.* 2014. № 5. S. 29–34. (rus.)
- [41] **Makarova L.V., Myshkin N.K., Makarenko V.M.** Fluorestsentnyy metod operativnogo kontrolya transformatornogo masla. *Chemistry and technology of fuels and oils.* 2016. № 2. S. 46–50.

#### THE AUTHORS

**LYUTIKOVA Marina N.** – *Federal grid company of Unified energy system.*

E-mail: [m.lyutikova@mail.ru](mailto:m.lyutikova@mail.ru)

**NEKHOROSHEV Sergei V.** – *Khanty-Mansiysk state medical academy*

E-mail: [serg-nehor@rambker.ru](mailto:serg-nehor@rambker.ru)

**KULKOV Mikhail G.** – *Yugorsk state university.*

E-mail: [mgk83@bk.ru](mailto:mgk83@bk.ru)

Received: 02.09.2018