

DOI: 10.18721/JEST.26301

УДК 537.311.324: 543.452: 535.37

*Д.В. Кизеветтер, А.С. Резник,  
Н.М. Журавлева, Д.В. Литвинов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ СМЕСИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Исследовались зависимости электрического сопротивления и спектры флуоресценции смесей диэлектрических жидкостей для силовых трансформаторов от относительной концентрации составляющих смеси. Произведена оценка электрического сопротивления на постоянном токе с использованием трех различных формул. Показано, что для смесей нефтяного масла марки ГК и диэлектрической жидкости MIDEЛ eN ни одна из формул не позволяет получить приемлемую точность оценки. Наиболее точно характер изменения сопротивления смеси от изменения концентрации составляющих исходных жидкостей описывает формула Ван Беека, а для искусственно состаренных смесей ни одна из формул не позволяет описать немонотонный характер изменения сопротивления. Установлено, что в первом приближении спектр флуоресценции определяется суммой спектров флуоресценции каждой из составляющих с коэффициентами, равными относительной концентрации составляющих. Подтверждена меньшая подверженность термическому старению смеси нефтяного масла и диэлектрической жидкости MIDEЛ eN при определенной концентрации составляющих.

*Ключевые слова:* диэлектрические жидкости, смесь диэлектриков, электрическое сопротивление, показатель преломления, флуоресценция.

*Ссылка при цитировании:*

Кизеветтер Д.В. и др. Влияние концентрации компонентов смеси диэлектрических жидкостей для силовых трансформаторов на электрическое сопротивление и оптические характеристики // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 26, № 3. С. 5–19. DOI: 10.18721/JEST.26301

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*D.V. Kiesewetter, A.S. Reznik,  
N.M. Zhuravleva, D.V. Litvinov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

## **INFLUENCE OF MIXTURE COMPONENTS CONCENTRATION OF DIELECTRIC LIQUIDS FOR POWER TRANSFORMERS ON THE ELECTRICAL RESISTANCE AND OPTICAL CHARACTERISTICS**

The paper studies the dependence of the electrical resistance and fluorescence spectra of mixtures of dielectric liquids for power transformers on the relative concentration of the components of the mixture. The electrical resistance at direct current was estimated using three different

formulas. It is shown that for the mixtures of “GK” brand petroleum oil and dielectric fluid MIDEL eN none of the formulas allows obtaining an acceptable accuracy of estimation. The L. K. H. van Beek formula most accurately describes the character of the change in the resistance of the mixture when the concentration of the components of the source liquids changes, and for artificially aged mixtures, none of the formulas can describe the non-monotonic character of the change in resistance. We found that the fluorescence spectrum is approximately determined by the sum of the fluorescence spectra of each of the components with coefficients equal to the relative concentration of the components. A lower susceptibility to thermal aging of the mixture of petroleum oil and dielectric fluid MIDEL eN at a certain concentration of components has been confirmed.

*Keywords:* dielectric liquids, binary mixtures, electric resistance, refractive index, fluorescence.

*Citation:*

D.V. Kiesewetter et al., Influence of mixture components concentration of dielectric liquids for power transformers on the electrical resistance and optical characteristics, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (03) (2020) 5–19, DOI: 10.18721/JEST.26301

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  и удельное электрическое сопротивление  $\rho$  являются важными характеристиками электротехнических материалов. Для широко используемых материалов эти величины хорошо известны. У композиционных материалов, а также у смесей диэлектрических жидкостей указанные параметры зависят от состава таких материалов. В настоящее время для повышения пожарной безопасности силовых трансформаторов, в частности, используются синтетические и натуральные эфиры [1–2], силиконовые охлаждающие жидкости [3]. Смеси нефтяных масел с различными эфирами в количестве 5 %...25 %, в том числе, с эфиром MIDEL eN на основе рапсового масла, применяют для уменьшения концентрации свободной влаги [4–5] в нефтяном масле и электроизоляционной бумаге, используя свойство синтетических и натуральных эфиров образовывать с небольшим количеством воды растворы, практически не ухудшающие электроизоляционных свойств жидкого диэлектрика [1–2, 6–7]. Согласно [1–2, 5–7], использование таких смесей увеличивает долговечность работы бумажно-пропитанной изоляции силовых трансформаторов. Для проектирования электротехнических устройств и создания новых материалов во многих случаях необходимо умение рассчитать параметры диэлектрика. В простейшем случае, диэлектрическую проницаемость среды  $\epsilon_c$ , состоящей из нескольких диэлектриков, определяют по формуле:

$$\epsilon_c = \frac{\sum_{k=1}^N \epsilon_k V_k}{\sum_{k=1}^N V_k}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество диэлектриков, входящих в состав композиционного материала или конструкции,  $k$  – индекс, по которому осуществляется суммирование,  $\epsilon_k$ ,  $V_k$  – диэлектрическая проницаемость и объем  $k$ -ого диэлектрика. Для оптических материалов, принимая во внимание, что квадрат показателя преломления среды  $n$  равен величине диэлектрической проницаемости [8–9], используя формулу (1), можно рассчитать показатель преломления такой среды как  $n_c = (\epsilon_c)^{1/2}$ . Предположительно формула (1) применима также для случаев, когда физическая величина обуславливается объемом вещества в композите, например интенсивность флуоресценции или поглощение электромагнитной волны.

Формула (1) подразумевает отсутствия взаимодействия составляющих композитного материала или веществ в смеси. Однако известно, что для растворов и смесей жидких диэлектриков формула (1) является не точной. Теоретические представления о методах расчета показателя преломления растворов и физико-химических процессах при смешивании жидкостей даны в [10]. В частности, в [10] подробно рассмотрено несколько типичных случаев изменения показателя преломления растворов от концентрации составляющих: с различной кривизной зависимости, с наличием экстремума, точкой сингулярности или перегиба.

Строгий общий подход к определению диэлектрической проницаемости, как например использованный в работах [11–14], представляет серьезную сложность, а параметры композитных материалов в действительности зависят от морфологии материала [11–12]. Еще более сложной является задача определения удельного сопротивления или проводимости композитных материалов, которые зависят от морфологии материала значительно сильнее, чем диэлектрическая проницаемость. Проблема такого расчета является актуальной для различных диэлектриков, например, вспененных материалов [15–16], нанодобавок к диэлектрическим жидкостям [17–18], терморевверсивного геля [19] или композитных материалов с углеродными нанотрубками [20–22]. Известны также различные способы расчета электрической проводимости композиционных материалов методом численного моделирования, как, например [23, 24].

Возможность использования различных формул для расчета электрической проводимости смесей диэлектрических жидкостей исследовалась в работе [25]. В качестве основы для расчета проводимости в [25] использовалась формула Ван Беека [26]. В [25] было выполнено сравнение расчетных и экспериментально измеренных значений проводимости смеси различных видов масел, а также трансформаторного масла и этанола, и установлено, что на промышленной частоте наилучшее соответствие дают формулы Силларса [27] (как частный случай [28]) и Рао и Раму [29].

Изучению параметров (диэлектрической проницаемости, проводимости и пробивного напряжения) смесей диэлектрических жидкостей посвящено большое количество научных работ [30–47], что свидетельствует об актуальности рассматриваемой задачи. В частности, результаты экспериментального исследования электрофизических свойств смесей синтетического эфира MIDEL 7131 и масла THESO представлены в работе [30], возможность улучшения эксплуатационных характеристик диэлектрических жидкостей для силовых трансформаторов за счет использования смеси нефтяных масел и синтетического эфира описана в работах [31–34, 38, 41]. Изучению вопросов старения смесей нефтяных масел и натурального или синтетического эфира, а также пропитанной смесью бумажной изоляции посвящены работы [35–37, 39]. Результаты исследования диэлектрических и физико-химических свойств смесей нефтяных масел и масел растительного происхождения представлены в работах [40, 42]. Диэлектрические свойства растительных масел (кокосовое, кунжутное, касторовое) и их смесей в качестве диэлектрической жидкости для силовых трансформаторов описаны в работе [43]. Результаты измерения электрической прочности смеси нефтяного и кукурузного масла приведены в [44], тепловые характеристики смесей нефтяных масел и различных эфиров даны в [45, 47]. Подробное рассмотрение физических механизмов старения бумажно-пропитанной изоляции на основе смесей диэлектрических жидкостей, в частности эфира, представлены в [46]. Некоторые сведения о флуоресценции смесей диэлектрических жидкостей для силовых трансформаторов приведены в работе [37]. В указанных работах ([30–47]) методика расчета удельного сопротивления смесей не рассматривалась.

Цель настоящей работы состояла в изучении возможности использования простейших формул для расчета удельного сопротивления смеси двух диэлектрических жидкостей, используемых в силовых трансформаторах: нефтяного масла марки ГК и натурального эфира MIDEL eN изготавливаемого на основе рапсового масла, а также проверке применимости гипотезы, рассматривающей смесь указанных жидких диэлектриков как смесь не взаимодействующих жидкостей.

### Материалы и методика измерений

Экспериментально исследовались смеси диэлектрических жидкостей, используемые для силовых трансформаторов: нефтяного масла ГК и натурального эфира MIDEL eN, а также ГК и силиконовой жидкости «Софэксил-ТСЖ». Диэлектрические жидкости были осушены в заводских условиях. Так как интерес в данной работе представляли изменения параметров жидких диэлектриков при различных относительных концентрациях составляющих смеси, а не абсолютные значения параметров, осушка смесей и исходных жидкостей непосредственно перед измерениями не проводилась. Измерение электрического сопротивления смесей производилось в двухэлектродной измерительной ячейке [48] из немагнитной стали с помощью гигаомметра «METREL» при постоянном напряжении 500 В. Спектр флуоресценции смесей определялся с использованием спектрометра «Avaspec-2048» при боковом возбуждении флуоресценции в кварцевой кювете лучом полупроводникового лазера с длиной волны 405 нм, мощностью 2 мВт и диаметром пучка приблизительно 1 мм.

### Полученные данные

Экспериментально полученные зависимости электрического сопротивления смеси диэлектрических жидкостей в измерительной ячейке от относительной концентрации нефтяного масла при различных температурах приведены на рис. 1.

Были рассмотрены две альтернативные простейшие модели для описания изменения электрического сопротивления смесей и формула Ван Беека. Первая модель – модель, основанная на последовательной эквивалентной схеме, для которой суммарное сопротивление  $R$  вычисляется как суммарное сопротивление двух слоев, образуемых разными диэлектриками:

$$R = n_{GK} R_{GK} + (1 - n_{GK}) R_{ML}, \quad (2)$$

где  $n_{GK}$  – относительная концентрация нефтяного масла ( $0 \leq n_{GK} \leq 1$ ),  $R_{GK}$  и  $R_{ML}$  – сопротивление нефтяного масла (при отсутствии натурального эфира в смеси) и натурального эфира (при отсутствии нефтяного масла) в измерительной ячейке. Формула (2) дает линейную зависимость сопротивления  $R$  от  $n_{GK}$  с предельными значениями, равными  $R_{ML}$  при  $n_{GK} = 0$  и  $R_{GK}$  при  $n_{GK} = 1$ . Хорошо известно, что такая модель неприменима для материалов, содержащих твердые частицы инородного вещества в диэлектриках любого типа, а также для воздушно-пластиковой изоляции. Однако в некоторых случаях, в частности для частиц известняка в трансформаторном масле, аналогия с расчетом удельной диэлектрической проницаемости дает удовлетворительное соответствие модели и экспериментальных данных [49]. Для данной модели на рис. 1 – это зависимости 4-6.

Вторая модель основана на параллельной эквивалентной схеме, которая предполагает протекание тока по двум параллельным сопротивлениям, образуемых различными диэлектриками. Применительно к смеси жидкостей, данная модель предполагает независимое протекание тока по каждой из составляющих, соответственно суммирование проводимостей диэлектриков для определения сопротивления смеси. В этом случае имеет место:

$$R = \frac{R_{GK} R_{ML}}{n_{GK} R_{ML} + (1 - n_{GK}) R_{GK}}. \quad (3)$$

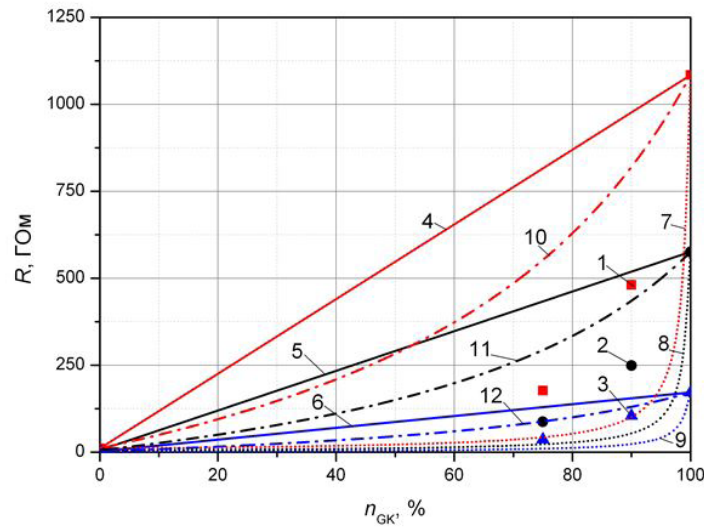


Рис. 1. Величина электрического сопротивления смеси диэлектрических жидкостей в измерительной ячейке как функция относительной концентрации масла ГК: 1–3 – эксперимент, 4–6, 7–9 и 10–12 – расчет с использованием формул (2), (3) и (4) соответственно, 1, 4, 10 – при  $T = 350$  C, 2, 5, 8 – при  $T = 500$  C, 3, 6, 9 – при  $T = 700$  C

Fig. 1. Value of the electrical resistance of the mixture of dielectric liquids in the measuring cell as a function of the relative concentration of oil "GK": 1–3 – experiment, 4–6, 7–9 and 10–12 – calculation using the formulas (2), (3) and (4), respectively, 1, 4, 10 – at  $T = 350$  C, 2, 5, 8 – at  $T = 500$  C, 3, 6, 9 – at  $T = 700$  C

Предельные значения сопротивления  $R$  как функции  $n_{GK}$  для данной модели такие же, как и для первой модели. Как первая, так и вторая рассмотренные физические модели аналогичны моделям для определения механических характеристик композитных материалов [50]. Расчетные зависимости  $R(n_{GK})$  для второй модели также приведены на рис. 1 (зависимости 7–9).

Согласно формуле Ван Беека [25, 26], проводимость  $Y$  смеси диэлектрических жидкостей, с учетом введенных ранее обозначений, можно вычислить по формуле:

$$Y = Y_{GK} \frac{2Y_{GK} + Y_{ML} + 2(1 - n_{GK})(Y_{ML} - Y_{GK})}{2Y_{GK} + Y_{ML} - (1 - n_{GK})(Y_{ML} - Y_{GK})}, \quad (4)$$

где  $Y_{GK}$ ,  $Y_{ML}$  – проводимость каждой из диэлектрических жидкостей. Соответственно:  $R(n_{GK}) = 1/Y$ .

Как следует из полученных результатов (рис. 1), ни одна из простейших моделей не позволяет правильно описать изменение сопротивления смеси при варьировании концентрации двух использованных составляющих. Так, при относительной концентрации  $n_{GK} = 90\%$  первая модель завышает реальное значение сопротивления приблизительно в 1.5...2 раза, формула Ван Беека – в 1.2...1.7 раза (в зависимости от температуры), а вторая модель – занижает почти в 5 раз. Для случая  $n_{GK} = 75\%$  формулы (2) и (4) также дают завышенные значения сопротивления  $R$  в 2.7...3 раза, а формула (3) занижает реальные величины приблизительно в 3...4 раза.

Экспериментально полученная зависимость  $R(n_{GK})$  является нелинейной с увеличивающейся величиной производной при  $n_{GK} \rightarrow 1$ . Такой характер изменения  $R(n_{GK})$  лучше остальных описывает формула Ван Беека (4). Из полученных данных следует, что применительно к смесям нефтяного масла ГК и диэлектрической жидкости MIDEЛ eN рассмотренные формулы можно ис-

пользовать только для грубой оценки электрического сопротивления смесей, полагая значения, рассчитанные по формуле (4), как максимальные, а по формуле (3) – как минимальные.

При замене нефтяного масла на иную диэлектрическую жидкость в силовом трансформаторе или наоборот (особенно без проведения промывки) образующийся жидкий диэлектрик представляет собой смесь новой и ранее использованной диэлектрических жидкостей, концентрация которых точно неизвестна. Простым и оперативным способом измерения концентраций составляющих в смесях углеводородов является метод флуоресцентного анализа. Однако возможность его применения для смесей натурального эфира MIDEL eN и нефтяного масла марки ГК ранее не проверялась.

Были измерены спектры флуоресценции полученных смесей диэлектрических жидкостей (рис. 2). Из рис. 2 видно, что спектры флуоресценции жидкостей отличаются как по форме спектра, так и по интенсивности. Локальный максимум спектральной плотности при длине волны 405 нм обусловлен рассеянием излучения накачки. Если считать, что диэлектрические жидкости в смеси не оказывают взаимного влияния, то спектральную плотность  $S_{mix}(\lambda)$  интенсивности флуоресценции смеси можно вычислить по формуле, аналогичной (2):

$$S_{mix}(\lambda) = n_{GK} S_{GK} + (1 - n_{GK}) S_{ML}(\lambda), \quad (5)$$

где  $S_{GK}(\lambda)$  и  $S_{ML}(\lambda)$  – спектры флуоресценции нефтяного масла ГК и натурального эфира MIDEL eN, измеренные в одном масштабе при одинаковых условиях. На основании измеренных спектров флуоресценции исходных жидкостей, используя формулу (5), были рассчитаны значения спектральной плотности интенсивности флуоресценции смесей на двух длинах волн – вблизи максимальных значений  $S_{GK}(\lambda)$  и  $S_{ML}(\lambda)$  – 440 нм и 494 нм соответственно. Результаты расчета и экспериментально измеренные значения приведены на рис. 3 в нормированных величинах. За единицу принята величина спектральной плотности излучения флуоресценции при  $\lambda = 440$  нм. Из рис. 3 следует, что расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии.

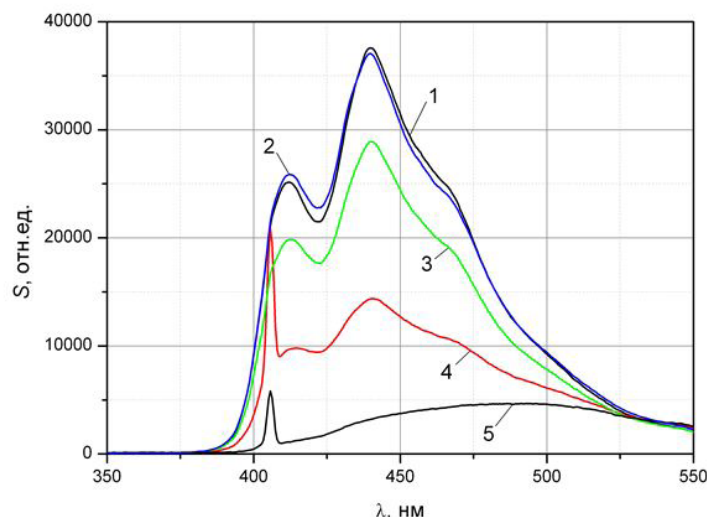


Рис. 2. Спектры флуоресценции смесей в относительных единицах.  
Содержание ГК: 1 – 100%, 2 – 90%, 3 – 75%, 4 – 25%, 5 – 0%

Fig. 2. Fluorescence spectra of the mixtures in relative units.  
Contents of the oil “GK”: 1 – 100%, 2 – 90%, 3 – 75%, 4 – 25%, 5 – 0%



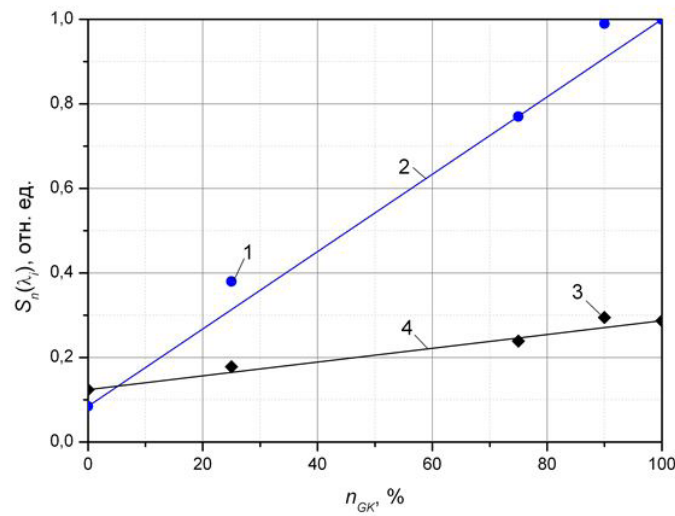


Рис. 3. Нормированные значения спектральной плотности интенсивности флуоресценции на длине волн: 1, 2 – 440 нм, 3, 4 – 494 нм, 1, 3 – эксперимент, 2, 4 – расчет с использованием формулы (5)  
 Fig. 3. Normalized values of the spectral density of the fluorescence intensity at the wavelength: 1, 2 – 440 nm, 3, 4 – 494 nm; 1, 3 – experiment, 2, 4 – calculation using the formula (5)

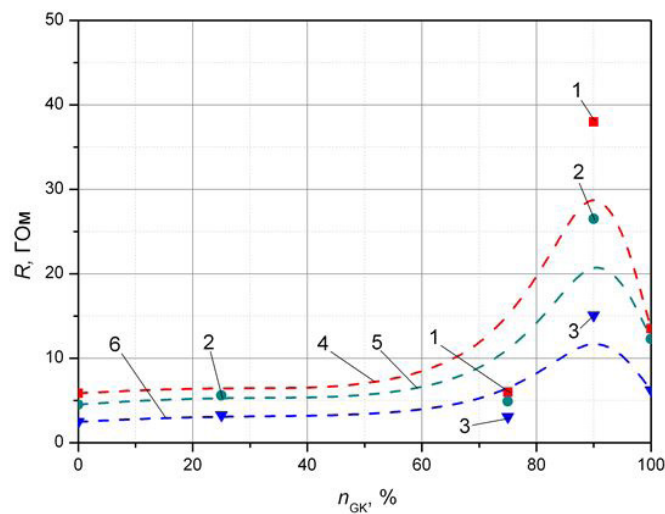


Рис. 4. Величина электрического сопротивления смеси диэлектрических жидкостей после 20 часов искусственного старения в измерительной ячейке (эксперимент и аппроксимация данных b-сплайном) при температуре смеси: 1 – 300 С, 2 – 360 С, 3 – 460 С  
 Fig. 4. Value of the electrical resistance of the mixture of dielectric liquids after 20 hours of artificial aging in the measuring cell (experiment and data approximation by b-spline) at the temperature of the mixture: 1 – 300 C, 2 – 360 C, 3 – 460 C

Было также произведено измерение электрического сопротивления рассмотренных выше смесей диэлектрических жидкостей при различной температуре после термического старения в течение 20 часов. Полученные зависимости  $R(n_{ГК})$  приведены на рис. 4. Зависимости имеет максимум при относительной концентрации нефтяного масла ГК 90 %. Это означает, что смесь, содержащая 90 % масла ГК и 10 % натурального эфира MIDEЛ eN имеет наибольшее электрическое сопротивление из исследованных жидкостей. В частности у состаренной в течение 20 часов смеси

сопротивление  $R(n_{ГК} = 90 \%)$  больше, чем у состаренного чистого масла ГК ( $R(n_{ГК} = 100 \%)$ ) более, чем в 2,5 раза. Похожий эффект, используемый для улучшения эксплуатационных характеристик трансформаторного масла за счет добавления в нефтяное масло синтетического эфира MIDEL 7131, описан в патентах [4, 5].

Очевидно что, ни одна из указанных выше моделей не может описать экспериментально полученные зависимости, представленные на рис. 4, так как все модели дают монотонно изменяющиеся функции сопротивления от относительной концентрации (для рассмотренной смеси – монотонно возрастающей). Получить качественную аппроксимацию полученных данных, позволяющую сделать предположения о физических явлениях в процессе термического старения смесей, при малом количестве экспериментальных точек невозможно. Поэтому на рис. 2 для наглядного представления характера полученных зависимостей  $R(n_{ГК})$  использована *b*-сплайн аппроксимация [51] (зависимости 4-6).

Похожий результат был получен для смесей нефтяного масла «ГК» и силиконовой трансформаторной жидкости «Софэксил-ТСЖ»: зависимость интенсивности флуоресценции от объемного содержания нефтяного масла в смеси приблизительно линейная, а электрического сопротивления – нелинейная.

### Заключение

Из полученных данных следует, что рассмотренные выше формулы не позволяют точно определить удельное электрическое сопротивление смесей использованных диэлектрических жидкостей. Наиболее точно характер изменения сопротивления от относительной концентрации составляющих смесей дает формула Ван Беека. Оценку концентрации нефтяного масла в смеси можно выполнить с использованием флуоресцентного анализа в линейном приближении по изменению интенсивности флуоресценции по сравнению с интенсивностью флуоресценции чистого (100 %) нефтяного масла. Принимая во внимание ранее полученные экспериментальные данные [52] относящиеся к параметрам диэлектрической жидкости MIDEL eN в процессе искусственного старения, можно предположить, что при термическом старении смеси исследованных диэлектрических жидкостей их нельзя считать не взаимодействующими: электрические и оптические параметры смеси после старения не соответствуют параметрам смеси состаренных по отдельности составляющих.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] MIDEL 7131 biodegradable synthetic ester transformer fluid. Режим доступа: <https://www.midel.com/midel-range/midel-7131/> (дата обращения: 30.07.2020).
- [2] MIDEL eN 1204 natural ester transformer fluid. Режим доступа: <https://www.midel.com/midel-range/midel-en1204/> (дата обращения: 30.07.2020).
- [3] Силиконовая трансформаторная жидкость СОФЭКСИЛ-ТСЖ. Рекомендации по применению. Техническое описание и характеристики. [https://www.sofex-silicone.ru/upload/file/pdf/sofexil\\_tcj.pdf](https://www.sofex-silicone.ru/upload/file/pdf/sofexil_tcj.pdf) (дата обращения: 30.07.2020).
- [4] **Bessede J.-L., Perrier C., Beroual A.** US patent No 7833440. High performance dielectric oil and the use thereof in highvoltage electrical equipment. H01B 3/20. Nov. 2010.
- [5] **Виноградов А.В., Пестряева Л.М., Светоносков В.П., Фишлер Я.Л.** Пат РФ № 27265. Трансформатор. H01F 27/12, опублик. 10.03.2003 г.
- [6] MIDEL 7131 Moisture Tolerance. [https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL\\_7131\\_Moisture\\_Tolerance.pdf](https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL_7131_Moisture_Tolerance.pdf) (дата обращения: 30.07.2020).
- [7] MIDEL eN 1215 Moisture Tolerance and Asset Life Extension. [https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL\\_eN\\_1215\\_Moisture\\_Tolerance\\_Asset\\_Life\\_Extension.pdf](https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL_eN_1215_Moisture_Tolerance_Asset_Life_Extension.pdf) (дата обращения: 30.07.2020).



- [8] **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. Изд. 2-е. Перевод с английского. М.: Наука, 1973. 713 с.
- [9] **Ефимов А.М.** Оптические свойства материалов и механизмы их формирования. – СПб: СПб-ГУИТМО., 2008 – 103 с.
- [10] **Иоффе Б.Б.** Рефрактометрические методы химии. – Л.: Химия, 1983. – 352 с.
- [11] **Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н., Савельева И.Ю.** Оценка диэлектрической проницаемости композита с дисперсными включениями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 3, С. 50–64.
- [12] **Tuncer E.** A formula for dielectric mixtures. *J. Philosophical Magazine Letters*. 85(6) (2005) 269–275.
- [13] **Pawar V.P., Shagufta T., Patil A.V.** Structural Properties in Binary Mixtures of Polar Molecules through Microwave Dielectric Technique. *Proc. 19<sup>th</sup> IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, United Kingdom, 25–29 June, 2017.* (2017) 1–4.
- [14] **Haukalid K., Folger K.** Dielectric Mixture Models for Hydrate Formation and Agglomeration. *Proc. 2018 12<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA).* (2018) 1–4.
- [15] **Winkel D., Puffer R., Schnettler A.** Investigation on the Dielectric Material Parameters and the Electric Conductivity of Syntactic Foam at the Liquid Nitrogen Temperature Range. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 25(3) (2015) 7700605.
- [16] **Machetti D., Moal E., Seifert J.M., Puffer R.** Electrical characterization of low-density solid insulating fillers for hollow-core composite insulators. *Proc. 3<sup>d</sup> Conference on Dielectrics (ICD-2020), 6<sup>th</sup>–31<sup>st</sup> July 2020, Valencia, Spain.* (2020) 673–676.
- [17] **Liu R.** A novel insulation system in gelatinizing hydrocarbon oil with styrenic block copolymers. *Proc. 3<sup>d</sup> Conference on Dielectrics (ICD-2020), 6<sup>th</sup>–31<sup>st</sup> July 2020, Valencia, Spain.* (2020) 708–711.
- [18] **Sarov M.S., Preetha P.** Optimization of filler loading of multi-particle mineral oil nanofluid for transformer insulation. *Proc. 3<sup>d</sup> Conference on Dielectrics (ICD-2020), 6<sup>th</sup>–31<sup>st</sup> July 2020, Valencia, Spain.* (2020) 712–715.
- [19] **Logakis E., Christen T., Scheel S., Adamczyk B., Qi L., Liu R.** Oil-to-gel insulation: A novel eco-efficient insulation concept. *Proc. 3<sup>d</sup> Conference on Dielectrics (ICD-2020), 6<sup>th</sup>–31<sup>st</sup> July 2020, Valencia, Spain.* (2020) 782–785.
- [20] **Demidenko N., Ichkitidze L., Murashko D., Kurilova U., Zar V.** Electrical conductivity study of composite nanomaterials containing carbon nanotubes. *Proc. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg.* (2019) 2264–2267.
- [21] **Kizevter D.V., Malyugin V.I., Borisova M.E., Seleznev D.A., Kamalov A.M.** Estimation of single-walled carbon nanotube concentration in polyethylene using the spectral correlation method. *J. Opt. Technol.* 87(1) (2020) 8–10.
- [22] **Demidenko N., Ichkitidze L., Murashko D., Kurilova U., Zar V.** Electrical Conductivity Study of Composite Nanomaterials Containing Carbon Nanotubes. *Proc. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus).* (2019).
- [23] **Wang Xilin, Xu Xiaoran, Wang Jun, Yao Youwei, Jia Zhidong, Ju Xuecheng.** Study of nonlinear nanoparticles doped silicone rubber composites and its dielectric properties. *Proc. 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP).* (2016) 727–730.
- [24] **Stelmashchuk A., Karbovnyk I., Klym H., Lukashevych D., Chalyy D.** Simulation of the tunnelling conductivity in nanotube/dielectric composite. *Proc. 2017 IEEE 37<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO).* (2017) 209–212.
- [25] **Ramu T.S., Narayana Rao Y.** On the Evaluation of Conductivity of Mixtures of Liquid Dielectrics. *IEEE Transactions on Electrical Insulation.* EI-8(2) (1973) 55–60.
- [26] **van Beek L. K. H.** Dielectric behaviour of heterogeneous systems, in Iliffe Books Ltd, J. B. Birks (ed.), *Progress in Dielectrics.* 7 (1967) 69–114.

- [27] **Sillars R.W.** The properties of a dielectric containing semi-conducting particles of various shapes. *J. Inst. Elec. Eng. (Tokyo)*. 80 (1937) 378–394.
- [28] **Kharadly M.M.Z., Jackson W.** The properties of artificial dielectrics comprising arrays of conducting elements. *Proc. Inst. Elect. Eng.* 100 (1953) 199–212.
- [29] **Rao Y.N., Ramu T.S.** Determination of the permittivity and loss factor of mixtures of liquid dielectrics. *EI-7* (1972) 195–199.
- [30] **Timoshkin I.V., MacGregor S.J., Given M.J., Wilson M.P.** Mixtures of Midel 7131 and THESO Insulating Liquids for Pulsed Power Applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 18(4) (2011) 1256–1261.
- [31] **Perrier C., Beroual A., Bessedé J.L.** Improvement of power transformers by using mixed insulations of mineral oil with synthetic esters. 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDEL 2005), Coimbra, Portugal. (2005) 389–392.
- [32] **Fofana I., Wasserberg V., Borsi H., Gockenbach E.** Challenge of mixed insulating liquids for use in high voltage transformers. Part1: Investigation of mixed liquids. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 18(3) (2002) 18–31.
- [33] **Fofana I., Borsi H., Gockenbach E.** Challenge for a mixed insulating liquid for using in high voltage transformers. Part2: Dielectric behaviour of the mixed liquids impregnated paper insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 18(4) (2002) 5–16.
- [34] **Ruijin Liao, Jian Hao, Lijun Yang, Shuaiwei Liang, Jianguo Yin.** Improvement on the anti-aging properties of power transformers by using mixed insulating oil. 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, New Orleans, USA. (2010) 588–591.
- [35] **Ruijin Liao, Jian Hao, Lijun Yang, Stanislaw Grzybowski.** Study on aging characteristics of mineral oil/natural ester mixtures-paper insulation. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*. (2011) 1–4.
- [36] **Zhuravleva N., Reznik A., Kiesewetter D.** Study of thermal aging of mixture of transformer insulating liquids. *Proc. ELEKTRO-2016, High Tatras, Slovak Rep.* (2016) 645–648.
- [37] **Kiesewetter D.V., Reznik A.S., Zhuravleva N.M., Litvinov D.V.** Investigation of optical characteristics of mixtures of dielectric liquids in the process of artificial aging. *Proc. 2019 IEEE conf. of Russian young researches in electrical and electronics engineering.* (2019) 819–823.
- [38] **Fofana I., Wasserberg V., Borsi H., Gockenbach E.** The electrical and dielectrical behaviour of mixed insulation liquids for transformers. *Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99)*, Nara, Japan, July 20–25. (1999) 491–494.
- [39] **Mohan Rao U., Harish Pulluri, Goutham Kumar N.** Performance analysis of transformer oil/paper insulation with ester and mixed dielectric fluids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 25(5) (2018) 1853–1862.
- [40] **Haichuan Yu, Rong Chen, Xiaobo Hu, Xiaogang Xu, Yang Xu.** Dielectric and physicochemical properties of mineral and vegetable oils mixtures. *Proc. 19<sup>th</sup> IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, Manchester, United Kingdom, 25 – 29 June, 2017. (2017) 1–4.
- [41] **Dombek G., Gielniak J., Wroblewski R.** Fire safety and electrical properties of mineral oil/synthetic ester mixtures. *Proc. 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*. (2017) 227–230.
- [42] **Dumitran L.M., Gorun F., Nicolae S., Mirica C.** Dielectric properties of mineral and vegetable oils mixtures for power transformers. *Proc. 2019 11<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. (2017) 1–6.
- [43] **Kumara R.S.S., Fernando M.A.R.M., Kalpage C.S.** Comparison of coconut/sesame/castor oils and their blends for transformer insulation. *Proc. 2017 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*. (2017) 1570379870 1–6.

[44] **Salama Manjang, Ikhlas Kitta, Abdi Ikhlas.** Voltage breakdown characteristics of transformer mineral oil with varies the composition of corn oil. Proc. 2019 2<sup>nd</sup> International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems. (2019) 1–4.

[45] **Nadolny Z., Dombek G., Przybylek P.** Thermal properties of a mixture of mineral oil and synthetic ester in terms of its application in the transformer. Proc. 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). (2016) 857–860.

[46] **Mohan Rao U., Narendra Kumar Y., Raj Kumar Jarial.** Understanding the ageing behaviour of transformer oil–paper insulation with ester and mixed dielectric fluids. IET Science, Measurement & Technology (2018) 12(7) 851–857.

[47] **Ahmed Hamdi, Issouf Fofana, Mahi Djillali.** Stability of mineral oil and oil–ester mixtures under thermal ageing and electrical discharges. IET Generation, Transmission & Distribution. (2017) 11(9) 2384–2392.

[48] ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. 1975 (переизд. 2008), М., Издательство Стандартов, 16 с.

[49] **Могилевская Т.Ю., Обухов В.И.** Об определении удельной проводимости смеси двух диэлектриков // Известия Томского политехнического института им. С.И. Кирова. 1966. Т. 149, С. 169–170.

[50] **Gaziz Yerbolat, Shynggys Amangeldi, Md. Hazrat Ali, Nazym Badanova, Asset Ashirbeok, Gulzhan Islam.** Composite materials property determination by rule of mixture and monte carlo simulation. Proc. 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM). (2018) 384–387.

[51] OriginLab. Help Online. X-Function-bspline. <https://www.originlab.com/doc/X-Function/ref/bspline> (дата обращения: 30.07.2020).

[52] **Zhuravleva N., Reznik A., Tukacheva A., Kiesewetter D., Smirnova E.** The study of thermal aging components paper-impregnated insulation of power transformers. Proc. 2016 IEEE North West Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2016, P. 747–751.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КИЗЕВЕТТЕР Дмитрий Владимирович** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р физ.-мат. наук.  
E-mail: kizevetter\_dv@spbstu.ru

**РЕЗНИК Александр Сергеевич** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: alexreznik85@gmail.com

**ЖУРАВЛЕВА Наталия Михайловна** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: natalia\_zhurav@mail.ru

**ЛИТВИНОВ Данила Васильевич** – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.  
E-mail: disherx@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 17.07.2020

## REFERENCES

[1] MIDEL 7131 biodegradable synthetic ester transformer fluid. Rezhim dostupa: <https://www.midel.com/midel-range/midel-7131/> (data obrashcheniya: 30.07.2020).

- [2] MIDEЛ eN 1204 natural ester transformer fluid. Rezhim dostupa: <https://www.midel.com/midel-range/midel-en1204/> (data obrashcheniya: 30.07.2020).
- [3] Silicone transformer fluid SOFEKSIL-TSZH. Recommendations for use. Technical description and characteristics. [https://www.sofex-silicone.ru/upload/file/pdf/sofexil\\_tcj.pdf](https://www.sofex-silicone.ru/upload/file/pdf/sofexil_tcj.pdf) (data obrashcheniya: 30.07.2020).
- [4] **J.-L. Bessede, C. Perrier, A. Beroual**. US patent No 7833440, High performance dielectric oil and the use thereof in highvoltage electrical equipment, H01B 3/20. Nov. 2010.
- [5] **A.V. Vinogradov, L.M. Pestryayeva, V.P. Svetonosov, Ya.L. Fishler**, Pat RF № 27265. Transformator. H01F 27/12, opubl. 10.03.2003 g.
- [6] MIDEЛ 7131 Moisture Tolerance. [https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEЛ\\_7131\\_Moisture\\_Tolerance.pdf](https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEЛ_7131_Moisture_Tolerance.pdf) (data obrashcheniya: 30.07.2020).
- [7] MIDEЛ eN 1215 Moisture Tolerance and Asset Life Extension. [https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEЛ\\_eN\\_1215\\_Moisture\\_Tolerance\\_Asset\\_Life\\_Extension.pdf](https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEЛ_eN_1215_Moisture_Tolerance_Asset_Life_Extension.pdf) (data obrashcheniya: 30.07.2020).
- [8] **M. Born, E. Volf**, *Osnovy optiki*. Izd. 2-ye. Perevod s angliyskogo. M.: Nauka, 1973. 713 s.
- [9] **A.M. Yefimov**, *Opticheskiye svoystva materialov i mekhanizmy ikh formirovaniya* [Optical properties of materials and mechanisms of their formation]. – SPb: SPbGUITMO., 2008 – 103 s.
- [10] **B.B. Ioffe**, *Refraktometricheskiye metody khimii* [Refractometric methods of chemistry]. – L.: Khimiya, 1983. – 352 s.
- [11] **V.S. Zarubin, G.N. Kuvyrkin, I.Yu. Savelyeva**, Otsenka dielektricheskoy pronitsayemosti kompozita s dispersnymi vklyucheniymi [Estimation of the permittivity of a composite with dispersed inclusions] // Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroyeniye. 2015. № 3, C. 50–64.
- [12] **E. Tuncer**, A formula for dielectric mixtures. *J. Philosophical Magazine Letters*. 85(6) (2005) 269–275.
- [13] **V.P. Pawar, Shagufta Tabassum, A.V. Patil**, Structural properties in binary mixtures of polar molecules through microwave dielectric technique. Proc. 19<sup>th</sup> IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, United Kingdom, 25–29 June, 2017. (2017) 1–4.
- [14] **K. Haukalid, K. Folger**, Dielectric mixture models for hydrate formation and agglomeration. Proc. 2018 12<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA). (2018) 1–4.
- [15] **D. Winkel, R. Puffer, A. Schnettler**, Investigation on the dielectric material parameters and the electric conductivity of syntactic foam at the liquid nitrogen temperature range. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 25(3) (2015) 7700605.
- [16] **D. Machetti, E. Moal, J.M. Seifert, R. Puffer**, Electrical characterization of low-density solid insulating fillers for hollow-core composite insulators. Proc. 3<sup>d</sup> Conference on Dielectrics (ICD-2020), 6<sup>th</sup>–31<sup>st</sup> July 2020, Valencia, Spain. (2020) 673–676.
- [17] **R. Liu**, A novel insulation system in gelatinizing hydrocarbon oil with styrenic block copolymers. Proc. 3<sup>d</sup> Conference on Dielectrics (ICD-2020), 6<sup>th</sup>–31<sup>st</sup> July 2020, Valencia, Spain. (2020) 708–711.
- [18] **M.S. Sarov, P. Preetha**, Optimization of filler loading of multi-particle mineral oil nanofluid for transformer insulation. Proc. 3<sup>d</sup> Conference on Dielectrics (ICD-2020), 6<sup>th</sup>–31<sup>st</sup> July 2020, Valencia, Spain. (2020) 712–715.
- [19] **E. Logakis, T. Christen, S. Scheel, B. Adamczyk, L. Qi, R. Liu**, Oil-to-gel insulation: A novel eco-efficient insulation concept. Proc. 3<sup>d</sup> Conference on Dielectrics (ICD-2020), 6<sup>th</sup>–31<sup>st</sup> July 2020, Valencia, Spain. (2020) 782–785.
- [20] **N. Demidenko, L. Ichkitidze, D. Murashko, U. Kurilova, V. Zar**, Electrical conductivity study of composite nanomaterials containing carbon nanotubes. Proc. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St.Petersburg. (2019) 2264–2267.
- [21] **D.V. Kizevetter, V.I. Malyugin, M.E. Borisova, D.A. Seleznev, A.M. Kamalov**, Estimation of single-walled carbon nanotube concentration in polyethylene using the spectral correlation method. *J. Opt. Technol.* 87(1) (2020) 8–10.

- [22] **N. Demidenko, L. Ichkitidze, D. Murashko, U. Kurilova, V. Zar**, Electrical conductivity study of composite nanomaterials containing carbon nanotubes. Proc. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). (2019).
- [23] **Wang Xilin, Xu Xiaoran, Wang Jun, Yao Youwei, Jia Zhidong, Ju Xuecheng**, Study of nonlinear nanoparticles doped silicone rubber composites and its dielectric properties. Proc. 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). (2016) 727–730.
- [24] **A. Stelmashchuk, I. Karbovnyk, H. Klym, D. Lukashevych, D. Chalyy**, Simulation of the tunnelling conductivity in nanotube/dielectric composite. Proc. 2017 IEEE 37<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). (2017) 209–212.
- [25] **T. S. Ramu, Y. Narayana Rao**, On the evaluation of conductivity of mixtures of liquid dielectrics. IEEE Transactions on Electrical Insulation. EI-8(2) (1973) 55–60.
- [26] **L.K.H. van Beek**, Dielectric behaviour of heterogeneous systems, in Iliffe Books Ltd, J. B. Birks (ed.), Progress in Dielectrics. 7 (1967) 69–114.
- [27] **R.W. Sillars**, The properties of a dielectric containing semi-conducting particles of various shapes. J. Inst. Elec. Eng. (Tokyo). 80 (1937) 378–394.
- [28] **M.M.Z. Kharadly, W. Jackson**, The properties of artificial dielectrics comprising arrays of conducting elements. Proc. Inst. Elect. Eng. 100 (1953) 199–212.
- [29] **Y.N. Rao, T.S. Ramu**, Determination of the permittivity and loss factor of mixtures of liquid dielectrics. EI-7 (1972) 195–199.
- [30] **I.V. Timoshkin, S.J. MacGregor, M.J. Given, M. P. Wilson**, Mixtures of Midel 7131 and THESO Insulating Liquids for Pulsed Power Applications. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 18(4) (2011) 1256–1261.
- [31] **C. Perrier, A. Beroual, J. L. Bessede**, Improvement of power transformers by using mixed insulations of mineral oil with synthetic esters. 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDEL 2005), Coimbra, Portugal. (2005) 389–392.
- [32] **I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach**, Challenge of mixed insulating liquids for use in high voltage transformers. Part 1: Investigation of mixed liquids. IEEE Electrical Insulation Magazine. 18(3) (2002) 18–31.
- [33] **I. Fofana, H. Borsi, E. Gockenbach**, Challenge for a mixed insulating liquid for using in high voltage transformers. Part 2: Dielectric behaviour of the mixed liquids impregnated paper insulation. IEEE Electrical Insulation Magazine. 18(4) (2002) 5–16.
- [34] **Ruijin Liao, Jian Hao, Lijun Yang, Shuaiwei Liang, Jianguo Yin**, Improvement on the anti-aging properties of power transformers by using mixed insulating Oil. 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, New Orleans, USA. (2010) 588–591.
- [35] **Ruijin Liao, Jian Hao, Lijun Yang, Stanislaw Grzybowski**, Study on aging characteristics of mineral oil/natural ester mixtures-paper insulation. IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL). (2011) 1–4.
- [36] **N. Zhuravleva, A. Reznik, D. Kiesewetter**, Study of thermal aging of mixture of transformer insulating liquids. Proc. ELEKTRO-2016, High Tatras, Slovak Rep. (2016) 645–648.
- [37] **D.V. Kiesewetter, A.S. Reznik, N.M. Zhuravleva, D.V. Litvinov**, Investigation of Optical Characteristics of Mixtures of Dielectric Liquids in the Process of Artificial Aging. Proc. 2019 IEEE conf. of Russian young researches in electrical and electronics engineering. (2019) 819–823.
- [38] **I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, E. Gockenbach**, The electrical and dielectrical behaviour of mixed insulation liquids for transformers. Proceedings of 13<sup>th</sup> International Conference on Dielectric Liquids (ICDL'99), Nara, Japan, July 20-25. (1999) 491–494.
- [39] **U. Mohan Rao, Harish Pulluri, N. Goutham Kumar**, Performance analysis of transformer oil/paper insulation with ester and mixed dielectric fluids. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 25(5) (2018) 1853–1862.



- [40] **Haichuan Yu, Rong Chen, Xiaobo Hu, Xiaogang Xu, Yang Xu**, Dielectric and physicochemical properties of mineral and vegetable oils mixtures. Proc. 19<sup>th</sup> IEEE International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Manchester, United Kingdom, 25–29 June, 2017. (2017) 1–4.
- [41] **G. Dombek, J. Gielniak, R. Wroblewski**, Fire safety and electrical properties of mineral oil/synthetic ester mixtures. Proc. 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM). (2017) 227–230.
- [42] **L.M. Dumitran, F. Gorun, S. Nicolae, C. Mirica**, Dielectric properties of mineral and vegetable oils mixtures for power transformers. Proc. 2019 11<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). (2017) 1–6.
- [43] **R.S.S. Kumara, M.A.R.M Fernando, C.S. Kalpage**, Comparison of coconut/sesame/castor oils and their blends for transformer insulation. Proc. 2017 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). (2017) 1570379870 1–6.
- [44] **Salama Manjang, Ikhlas Kitta, Abdi Ikhlas**, Voltage breakdown characteristics of transformer mineral oil with varies the composition of corn oil. Proc. 2019 2<sup>nd</sup> International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems. (2019) 1–4.
- [45] **Z. Nadolny, G. Dombek, P. Przybylek**, Thermal properties of a mixture of mineral oil and synthetic ester in terms of its application in the transformer. Proc. 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). (2016) 857–860.
- [46] **U. Mohan Rao, Y. Narendra Kumar, Raj Kumar Jarial**, Understanding the ageing behaviour of transformer oil–paper insulation with ester and mixed dielectric fluids. IET Science, Measurement & Technology (2018) 12(7) 851–857.
- [47] **Ahmed Hamdi, Issouf Fofana, Mahi Djillali**, Stability of mineral oil and oil-ester mixtures under thermal ageing and electrical discharges. IET Generation, Transmission & Distribution. (2017) 11(9) 2384–2392.
- [48] State Standard 6581-75. Materialy elektroizolyatsionnyye zhidkiye. Metody elektricheskikh ispytaniy. [Liquid electrical insulation materials. Methods of electrical tests.] 1975 (pereizd. 2008), M., Izdatelstvo Standartov, 16 s.
- [49] **T.Yu. Mogilevskaya, V.I. Obukhov**, Ob opredelenii udelnoy provodimosti smesi dvukh dielektrikov [Determination of the specific conductivity of a mixture of two dielectrics] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta im. S.I. Kirova. 1966. T. 149. S. 169–170.
- [50] **Gaziz Yerbolat, Shynggys Amangeldi, Md. Hazrat Ali, Nazym Badanova, Asset Ashirbeek, Gulzhan Islam**, Composite Materials Property Determination by Rule of Mixture and Monte Carlo Simulation. Proc. 2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM). (2018) 384–387.
- [51] OriginLab. Help Online. X-Function-bspline. <https://www.originlab.com/doc/X-Function/ref/bspline> (data obrashcheniya: 30.07.2020).
- [52] **N. Zhuravleva, A. Reznik, A. Tukacheva, D. Kiesewetter, E. Smirnova**, The study of thermal aging components paper-impregnated insulation of power transformers. Proc. 2016 IEEE North West Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, 2016, P. 747–751.

## THE AUTHORS

**KIESEWETTER Dmitry V.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: kizevetter\_dv@spbstu.ru

**REZNIK Alexander S.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: alexreznik85@gmail.com

**ZHURAVLEVA Natalia M.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: natalia\_zhurav@mail.ru



**LITVINOV Danila V.** — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: disherx@mail.ru

**Received: 17.07.2020**