

Измерение пробивного напряжения вязких жидкостей

КИЗЕВЕТТЕР Д.В., ТРУБИН Д.А., КУЛКАЕВ А.Е.

СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены национальные стандарты измерения пробивного напряжения жидких диэлектриков, в частности регламентирующие методику измерений и основные параметры измерительной ячейки. Измерено пробивное напряжение жидкостей ПМС-1000, ПМС-12500 и ПМС-30000 различных производителей. Выявлены основные проблемы проведения измерений. На примере полиметилсилоксановых жидких диэлектриков показано, что в вязких жидкостях после пробоя образуется канал, состоящий из пузырьков газа, удерживаемых силой поверхностного натяжения, позволяющей во многих случаях каналу сохраняться длительное время. Выполнены теоретические расчеты, подтвержденные экспериментом, позволяющие оценить скорость движения пузырьков воздуха в полиметилсилоксановых жидкостях. Сделан вывод о необходимости увеличения интервалов времени между отдельными измерениями, а также интервала времени перед началом измерений после заливки испытуемой жидкости в измерительную ячейку. Показано, что необходимы визуальный контроль межэлектродной области и специальная методика перемешивания жидкости. На основе выполненной работы можно заявить, что существующие стандарты измерения пробивного напряжения применительно к вязким жидкостям требуют доработки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пробивное напряжение, вязкая жидкость, жидкий диэлектрик, измерения, стандарты

Пробивное напряжение является важнейшим параметром любого диэлектрика. Существуют методики определения пробивного напряжения различных электроизоляционных материалов, регламентируемые государственными стандартами. Для твердых диэлектриков методика измерения пробивного напряжения дана в ГОСТ 6433.3–71 [1], для жидких диэлектриков – в ГОСТ Р МЭК 60156–2013 [2]. Для некоторых электротехнических устройств и материалов при измерении пробивного напряжения рекомендуется использовать другие стандарты, в частности для диэлектрических жидкостей, заливаемых в кабельные муфты, – ГОСТ 6997–77 [3], для кремнийорганической (полиметилсилоксановой) электроизоляционной жидкости марки 132–12Д согласно ГОСТ 10916–7 [4] – ГОСТ 6581–75 [5]. Методика измерения пробивного напряжения электроизоляционной бумаги представлена в стандарте [6], конденсаторной бумаги – в [7, 8], древесины – в [9].

В США, а также в других странах мира широко используют стандарты *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*): для измерения пробивного напряжения электроизоляционных жидкостей с применением электродов дисковой формы используют стандарт *ASTM D877/D877M–19* [10], а с применением электродов полусферической формы – *ASTM D1816–12* (2019) [11]. Такие электроды называются стандартными *VDE* (*Verband Deutscher Elektrotechniker*) электродами, соответствующими стандарту *D1816–04* [12] и Российскому стандарту [2]. Для некоторых материалов и специфических условий эксплуатации используются и другие

методы измерений. В частности, для измерения пробивного напряжения натуральных эфиров и растительных масел, используемых в электрических аппаратах, применяют стандарт *ASTM D6871–17* [13], для жидких диэлектриков в импульсном режиме – *ASTM D3300–20* [14], для измерения параметров силиконовых жидкостей – *ASTM D2225–92* (1997) [15]. Европейский стандарт испытания электроизоляционных жидкостей IEC 60156 [16] аналогичен Российскому стандарту [2].

Основные отличия между стандартами *ASTM D–877* [10], *ASTM D–1816* [11], *IEC 60156* [16], а также Российскими стандартами следующие. Стандарт [10] требует использования электродов в форме диска, стандарты [11] и [5] – полусферической формы (*VDE*), стандарты [16] и [2] допускают использование как сферических, так и полусферических электродов; межэлектродный зазор в [10] – 2,54 мм, в [11] – 1 или 2 мм, в [16] – 2,5 мм; скорость подъема напряжения – 3, 0,7 и 2 кВ/с соответственно. Следует также отметить, что стандарт [10] не предполагает перемешивания жидкости при проведении измерений, [5] требует перемешивания жидкости после каждого отдельного измерения, [11] требует непрерывного перемешивания, а в стандартах [16] и [2] перемешивание является необязательной рекомендацией. В стандартах [10], [11] и [16] значение пробивного напряжения определяют по пяти измерениям, а в [2] и [5] – по шести.

Стандарт [2] применим ко всем типам электроизоляционных жидкостей номинальной вязкостью до 350 мм²/с при температуре 40 °С. Стандарт [5] распространяется на жидкие электроизоляционные матери-

алы нефтяного или растительного происхождения и синтетические, находящиеся при температуре испытания в текучем состоянии (имеющие вязкость менее $5000 \text{ мм}^2/\text{с}$). В [5] рекомендуется: «После каждого пробоя при помощи стеклянной палочки жидкость между электродами осторожно перемешивают для удаления продуктов разложения из межэлектродного пространства, не допуская при этом образования воздушных пузырьков». Для случая испытания жидких диэлектриков с вязкостью более $50 \text{ м}^2/\text{с}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ в [5] дана следующая рекомендация: «... когда удаление твердых продуктов разложения из межэлектродного пространства после пробоя затруднено, каждый последующий пробой осуществляют в отдельной порции жидкости, взятой из одной и той же пробы».

Большинство научных работ посвящено изучению электрического пробоя диэлектрических жидкостей с низкой вязкостью. В частности, хорошо изученные трансформаторные силиконовые жидкости также относятся к жидкостям с низким коэффициентом вязкости: «Софэксил-ТСЖ» и *Dow Corning 561* имеют кинематическую вязкость приблизительно 50 сСт [17–19] при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Физические эффекты при пробое силиконовой жидкости со средней и малой вязкостью описаны, например, в работах [20–23]. Однако в настоящее время в электротехнике используются жидкие диэлектрики – компаунды и гели, имеющие вязкость, превышающую величину, указанную в рассмотренном стандарте. Методика измерения пробивного напряжения для таких жидкостей в литературе не представлена.

Работа посвящена экспериментальному изучению и описанию проблем измерения пробивного напряжения вязких диэлектриков на примере силиконовых (полиметилсилоксановых) жидкостей.

Измерение пробивного напряжения электроизоляционных жидкостей ПМС-1000, ПМС-12500 и ПМС-30000 различных производителей проводилось на установке АИМ–80. Использовалась стандартная испытательная ячейка (6ДЕ.539.000 – ячейка измерительная) с электродами, соответствующими стандартам [2, 5]: ось системы электродов была горизонтальной и находилась на высоте 40 мм от дна ячейки; все части электрода находились на расстоянии более 20 мм от стенок ячейки; глубина погружения электрода в исследуемую жидкость была более 15 мм; внутренний объем ячейки составлял приблизительно 400 мл. Расстояние между электродами определялось с использованием микроскопа и штриховой меры и было задано равным 2,5 мм. Скорость подъема напряжения составляла приблизительно 2 кВ/с . Исследуемые жидкости были залиты в измерительную ячейку без предварительной дегазации и обезвоживания (в соответствии с п. 8 [2]) из герметично закрытой тары (с заводской осушкой и дегазацией), следуя рекомендации [5]: «медленно заполняют ячейку, следя за тем, чтобы струя жидкости стекала по ее стенке и не образовывалось пузырьков воздуха».

Подготовка измерительной ячейки к проведению испытаний была выполнена в соответствии с [2, 5].

Первый подъем напряжения до достижения пробоя жидкостей ПМС-1000 и ПМС-12500 был осуществлен через 2 ч после заливки жидкостей в измерительную ячейку, для ПМС-30000 – через 50 ч. В результате первого и последующих электрических пробоев в жидкости в межэлектродном пространстве образовывался визуально наблюдаемый канал, состоящий из продуктов разложения диэлектрика (рис. 1).

Для исследуемых диэлектрических жидкостей продукты разложения представляли собой пузырьки газа, взаимно удерживаемые силой поверхностного натяжения, что отличает рассматриваемый случай от случаев, описанных в [5, 23], так как продукты разложения преимущественно не являются твердыми. Как правило, возникающий канал самопроизвольно не разрушался. Если поднять напряжение до достижения пробоя, предварительно не удалив образовавшийся канал из межэлектродного промежутка, то, как показало исследование, значение пробивного напряжения снижается приблизительно до 10 кВ и менее, а пробой происходит по уже существующему каналу.

В соответствии с [2] последующий подъем напряжения должен выполняться не ранее, чем через 2 мин, а в соответствии с [5] – не ранее, чем через 5 мин. При выполнении измерений повторный подъем напряжения осуществлялся через 5 мин после удаления продуктов разложения из межэлектродной области. В соответствии с указанными выше стандартами напряжение пробоя было определено по шести измерениям. Для ПМС–12500 среднее значение составляло 63 кВ ,



Рис. 1. Внешний вид электродов с образовавшимся каналом из продуктов распада вязкой ПМС-жидкости (ПМС–12500) после пробоя

Fig. 1. Appearance of electrodes with the bridge formed from the decomposition products of the viscous PMS liquid (PDMS–12500) after breakdown

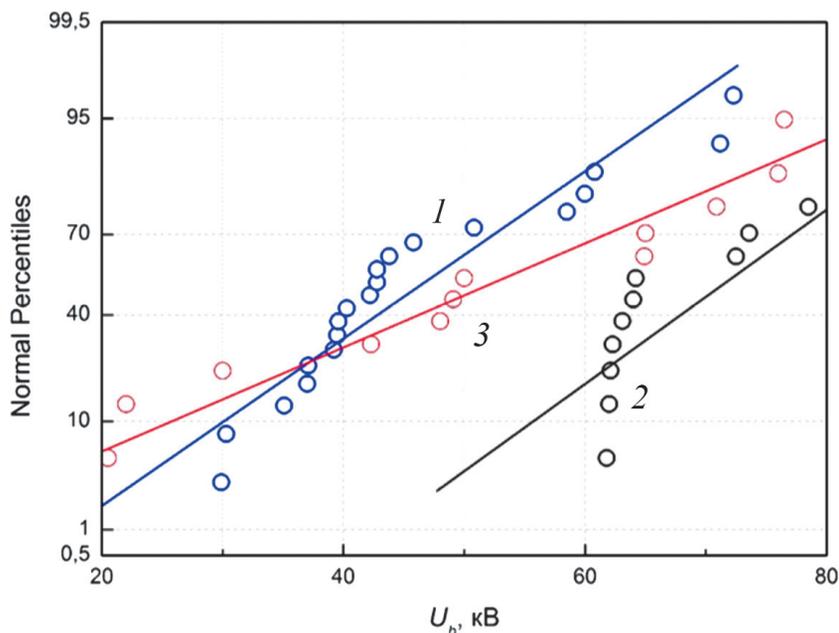


Рис. 2. Вероятностные характеристики пробоя (экспериментальные данные и прямая нормального распределения) силиконовых жидкостей: 1 – ПМС-1000; 2 – ПМС-12500; 3 – ПМС-30000

Fig. 2. Probabilistic breakdown characteristics (experimental data and the normal distribution line) of silicone liquids: 1 – PDMS-1000; 2 – PDMS-12500; 3 – PDMS-30000

среднеквадратическое отклонение – 0,8 кВ. Нормированный коэффициент вариации $V = 1,3\%$, т.е. согласно п. 4.3.2 «Оценка достоверности результатов испытаний» [5] результат измерений считается достоверным, так как значение V менее 20 % (п. 4.3.2.1 [5]).

Однако при последующих измерениях значение отдельных напряжений пробоя в жидкости ПМС-12500 начало увеличиваться (до 12-го отдельного измерения включительно). В жидкостях ПМС-1000 и ПМС-30000 в серии из 12 отдельных измерений наблюдалась тенденция к снижению пробивных напряжений. Можно предположить, что снижение значения отдельных напряжений пробоя обусловлено возникновением микропузырьков газа на поверхности электродов и в объеме жидкости при электрическом разряде, а также растворением продуктов распада в исследуемой жидкости. Вероятностные характеристики пробоя исследованных вязких жидкостей приведены на рис. 2.

Для жидкости ПМС-12500 по 12 измерениям получено: среднее значение – 71 кВ, среднеквадратическое отклонение – 12 кВ, соответственно нормированный коэффициент вариации $V = 17\%$, т.е. результат, так же как и для шести отдельных измерений, следует считать достоверным, а качество диэлектрика – соответствующим стандарту. Для ПМС-1000 и ПМС-30000 были получены значения 46 ± 12 кВ и 51 ± 20 кВ. Согласно [5] качество таких диэлектриков считается неудовлетворительным.

Следует отметить, что после 12 импульсов пробоя испытуемых ПМС-жидкостей с пятиминутными интервалами количество образовавшихся пузырьков газа и твердых продуктов разложения жидкости воз-

растает настолько, что выполнить условие отсутствия пузырьков газа в межэлектродной области становится невыполнимым. В качестве примера на рис. 3 показано изображение пузырьков газа в измерительной ячейке с испытуемой жидкостью ПМС-12500 после 12 отдельных измерений, полученное при боковой подсветке жидкости в ячейке.

Визуально на рис. 3 можно наблюдать пузырьки газа диаметром от 50 мкм до 1 мм, распределенные неравномерно по объему ячейки. Оценочная концентрация пузырьков газа в испытуемой жидкости составляла 20 ... 100 шт/см³.

Была проведена теоретическая оценка скорости подъема пузырьков газа в используемой вязкой ди-

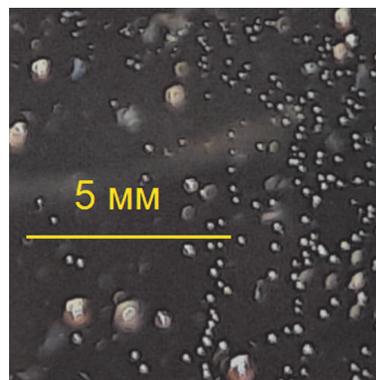


Рис. 3. Изображение пузырьков газа в объеме испытуемой жидкости ПМС-12500 после 12 отдельных измерений

Fig. 3. Image of the gas bubbles in the volume of the PDMS-12500 test liquid after 12 separate measurements

электрической жидкости типа ПМС–12500. Полагая, что скорость пузырька с течением времени стремится к постоянному значению, для оценки установившейся скорости подъема пузырьков можно использовать формулу:

$$V_s = \frac{2r^2\rho_0g}{9\nu} = \frac{2r^2g}{9\mu}, \quad (1)$$

где V_s – значение установившейся скорости движения; r – радиус пузырька; ρ_0 – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; ν – кинематическая вязкость жидкости; μ – динамическая вязкость жидкости.

В частности, для пузырьков диаметром $d = 1000$ мкм ($d = 2r$) теоретическое значение установившейся скорости движения в жидкости с вязкостью $\mu = 12500$ мм²/с и плотностью 970 кг/м³ будет составлять 0,044 мм/с, а для $d = 50$ мкм – 0,00011 мм/с.

Для проверки возможности использования формулы (1) было проведено экспериментальное исследование. Исследуемая жидкость заливалась в прозрачную кювету. Интенсивным перемешиванием в жидкости создавались пузырьки воздуха. Далее изображение пузырьков воздуха при их свободном движении регистрировалось телевизионной камерой. Скорость и диаметр пузырьков определялись по кадрам видеоизображения (рис. 4). Таким же способом измерялась скорость движения медных шариков диаметром 750 мкм (диаметр был предварительно измерен микрометром) под действием гравитации в указанных выше вязких жидкостях. Внешний вид кюветы с пузырьками возду-

ха, а также распределение интенсивности по заданной строке изображения приведены на рис. 4.

Результаты эксперимента следующие. Скорость движения шариков воздуха диаметром $d = 312$ мкм в жидкости ПМС-1250 составляла приблизительно 0,0077 мм/с, для шарика $d = 322$ мкм в жидкости ПМС-30000 – 0,0031 мм/с. Отношение указанных скоростей движения 2,45 близко обратному отношению значений вязкости этих жидкостей (2,4), отклонение появляется из-за небольшого отличия в диаметре шариков.

Скорость движения медных шариков в жидкости ПМС-12500 составляла приблизительно 0,18 мм/с, в жидкости ПМС-30000 – 0,0753 мм/с, отношение указанных скоростей движения 2,39 соответствует обратному отношению величин вязкости этих жидкостей (2,4), а также экспериментально измеренным значениям скорости.

Необходимо также отметить, что зависимость смещения пузырьков воздуха от времени для всех рассмотренных случаев хорошо аппроксимировалась прямой, т.е. имело место равномерное движение. Таким образом, для рассмотренных жидкостей имело место хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Следовательно, классическая формула (1) может использоваться для оценки скорости движения пузырьков воздуха в полиметилсилоксановых диэлектрических жидкостях с вязкостью 1000 сСт и более.

Принимая во внимание геометрические размеры стандартной ячейки для измерения пробивного напряжения, интервал времени τ_m с момента заливки испытуемой жидкости в ячейку до начала измерений оценивается величиной 16 ч – для ПМС-1000, более 200 ч – для ПМС-12500 и приблизительно 500 ч – для ПМС-30000. Однако необходимо отметить, что данная оценка применима только для одиночных пузырьков воздуха. В вязких жидкостях скорость движения группы близко расположенных пузырьков существенно больше, чем одиночных из-за движения окружающей их среды. Это позволяет полагать указанное выше время τ_m как максимальное значение, а также дает возможность пренебречь рассмотрением движения пузырьков воздуха меньшего диаметра, перемещающихся вверх вместе с более крупными пузырьками. Дисперсный состав и концентрация пузырьков воздуха в жидкости в значительной степени зависит от способа и скорости ее заливки в измерительную ячейку. По этой причине практически невозможно более точно оценить необходимый временной интервал после заливки жидкости перед проведением измерений, а также между измерениями, и целесообразно использовать визуальный контроль жидкости в межэлектродной области.

Выводы. В результате пробоя в вязкой диэлектрической жидкости образуется канал, состоящий из продуктов распада диэлектрика, способных сохраняться длительное время, в частности не разрушаться при обычном перемешивании жидкости, что требует использования специальной методики удаления продуктов распада из межэлектродной области.

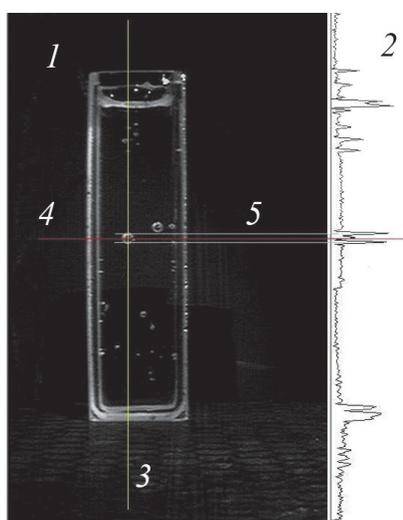


Рис. 4. Внешний вид кюветы с исследуемой жидкостью (ПМС-12500) и пузырьками воздуха 1, а также распределение интенсивности 2 по строке изображения 3; 4, 5 – линии, используемые для определения центра пузырька и измерения его диаметра

Fig. 4. The appearance of the cuvette with the test liquid (PDMS-12500) and air bubbles 1, as well as the intensity distribution 2 along the image line 3; 4, 5 – lines used to determine the center of the bubble and measure its diameter

Необходим визуальный контроль межэлектродного промежутка при удалении продуктов разложения исследуемой жидкости после электрического пробоя, что рекомендовано стандартом [2] (п. 9.3 «Проведение испытаний. Приложение напряжения»: «...после наполнения камеры и проверки на отсутствие видимых воздушных пузырьков в промежутке между электродами» и «...Проверяют отсутствие пузырьков воздуха в промежутке между электродами»).

Время от момента заливки жидкости до начала подъема напряжения должно быть выбрано исходя из вязкости испытуемой жидкости, а также целесообразно осуществлять визуальный контроль жидкости перед началом проведения измерений.

Измерение пробивного напряжения вязких диэлектрических жидкостей в строгом соответствии стандарту [2] представляет серьезную сложность, а использование стандартов [4, 10–16] невозможно. Таким образом, существующие стандарты требуют пересмотра и дополнения отдельными положениями о методике измерения пробивного напряжения вязких жидкостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 6433.3–71. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрической прочности при переменном (частоты 50 Гц) и постоянном напряжении. М.: Издательство стандартов, 1972, 52 с.
- ГОСТ Р МЭК 60156–2013. Жидкости изоляционные. Определение напряжения пробоя на промышленной частоте. М.: Стандартинформ, 2019, 7 с.
- ГОСТ 6997–77. Составы для заливки кабельных муфт. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1978, 7 с.
- ГОСТ 10916–74. Жидкость кремнийорганическая электроизоляционная 132-12Д. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1974, 11 с.
- ГОСТ 6581–75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. М.: Стандартинформ, 2008, 16 с.
- ГОСТ 26130–84. Бумага электроизоляционная. Методы определения электрической прочности при переменном (частоты 50 Гц) и постоянном напряжении. М.: Издательство стандартов, 1984, 6 с.
- ГОСТ 16745–83. Бумага конденсаторная. Метод определения пробивного напряжения при переменном (частоты 50 Гц) и постоянном напряжении. М.: Стандартинформ, 2006, 6 с.
- ГОСТ 28885–90. Конденсаторы. Методы измерений и испытаний. М.: Издательство стандартов, 1999, 29 с.
- ГОСТ 18407–73. Древесина. Метод определения электрической прочности при переменном напряжении. М.: Издательство стандартов, 2000, 3 с.
- ASTM D877 / D877M–19. Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- ASTM D1816–12(2019). Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- ASTM D1816–04. Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE Electrodes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- ASTM D6871–17. Standard Specification for Natural (Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D3300–20. Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Under Impulse Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- ASTM D2225–92. Standard Test Methods for Silicone Fluids Used for Electrical Insulation, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.
- IEC 60156. Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method, 2018, International Electrotechnical Commission (IEC), 2018, 37 p.
- Силиконовая трансформаторная жидкость СОФЭК-СИЛ-ТСЖ. Рекомендации по применению. Техническое описание и характеристики [Электрон. ресурс], URL: https://www.sofex-silicone.ru/upload/file/pdf/sofexil_tej.pdf (дата обращения 27.05.2021).
- Dow Corning 561 Silicone Transformer Liquid. Technical manual [Электрон. ресурс], URL: <https://docplayer.net/21470104-Dow-corning-561-silicone-transformer-liquid.html> (дата обращения 27.05.2021).
- XIAMETER PMX-561 Transformer Liquid. Polydimethylsiloxane. Technical Data Sheet [Электрон. ресурс], URL: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/product-datasheet/95/95-4/95-459-01-xiameter-pmx-561-transformer-liquid.pdf?iframe=true> (дата обращения 27.05.2021).
- Chadband W.G., Calderwood J.H. The Propagation of Discharges in Dielectric Liquids. – Journal of Electrostatics, 1979, vol. 7, No. 9, pp. 75–79.
- Watson P.K., Chadband W.G. The electrical breakdown of viscous silicone fluids. – 9th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1987, pp. 381–386.
- Watson P.K., Iqbal Qureshi M., Chadband W.G. The growth of prebreakdown cavities in silicone fluids and the frequency of the accompanying discharge pulses. – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, vol. 5, No.3, pp. 344–350.
- Crine J. Silicone oil as replacement fluid for PCBs in transformers. – Canadian Electrical Engineering Journal, 1986, vol. 11, No. 3, pp. 110–113.

[23.07.2021]



Авторы: **Кизеветтер Дмитрий Владимирович** – доктор физ.-мат. наук, профессор Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.



Трубин Денис Андреевич – аспирант Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.



Кулкаев Алан Едилулы – студент Высшей школы высоковольтной энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Viscous Liquid Breakdown Voltage Measurements

KIESEWETTER Dmitry V. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) – Professor of the Higher School of High-Voltage Power Engineering, Dr. Sci. (Phys.-Math.).

TRUBIN Denis A. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) – Postgraduate Student of the Higher School of High-Voltage Power Engineering.

KULKAEV Alan E. (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia) – Student of the Higher School of High-Voltage Power Engineering.

The national standards on measuring the breakdown voltage of liquid dielectrics are considered, in particular, the measurement procedure and the measuring cell main parameters. The breakdown voltage of PDMS-1000, PDMS-12500 and PDMS-30000 liquids produced by various manufacturers was measured, and the main problems faced in carrying out measurements were identified. It is shown, using the example of polydimethylsiloxane liquid dielectrics, that after breakdown of viscous liquids, a channel is produced in them, which consists of gas bubbles held by the surface tension force, due to which the channel may in many cases persist for a long time. Theoretical calculations confirmed by an experiment were performed, based on which the velocity of air bubbles in polydimethylsiloxane liquids can be estimated. A conclusion has been drawn about the necessity to increase the time intervals between individual measurements, as well as the time interval before the start of measurements after pouring the test liquid into the measurement cell. It is shown that visual control of the interelectrode region and a special method of mixing the liquid are also necessary. It can be stated based on the accomplished study that the existing standards for breakdown voltage measurements in viscous liquids need to be refined.

Key words: breakdown voltage, viscous liquid, liquid dielectric, measurements, standards

REFERENCES

- GOST 6433.3–71.** *Materialy elektroizolyatsionnye tverdye. Metody opredeleniya elektricheskoy prochnosti pri peremennom (chastoty 50 Gts) i postoyannom napryazhenii (Solid Electrical Insulating Materials. Methods for Evaluation of Electrical Strength at Alternating Voltage (at 50 Hz Frequency) and Direct Voltage).* M.: Izdatel'stvo standartov, 1972, 52 p.
- GOST R MEK 60156–2013.** *Zhidkosti izolyatsionnye. Opre-delenie napryazheniya proboya na promyshlennoy chastote (Insulating Liquids. Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency).* M.: Standartinform, 2019, 7 p.
- GOST 6997–77.** *Sostavy dlya zalivki kabel'nyh muft. Tekhnichesk-
kie usloviya (Compositions for Filling Cable Joints. Specifications).* M.: Izdatel'stvo standartov, 1978, 7 p.
- GOST 10916–74.** *Zhidkost' kremniyorganicheskaya elektroizo-
lyatsionnaya 132-12D. Tekhnicheskie usloviya (Silicone Insulating
Liquid 132-12D. Specifications).* M.: Izdatel'stvo standartov, 1974, 11 p.
- GOST 6581–75.** *Materialy elektroizolyatsionnye zhidkie.
Metody elektricheskikh ispytaniy (Liquid Electrical Insulating Materials.
Electric Test Methods).* M.: Standartinform, 2008, 16 p.
- GOST 26130–84.** *Bumaga elektroizolyatsionnaya. Metody
opre-deleniya elektricheskoy prochnosti pri peremennom (chastoty 50
Gts) i postoyannom napryazhenii (Electrical Insulating Paper. Methods
for Determination of Electrical Strength at Alternating (Frequency of
50 Hz) and Constant Voltage).* M.: Izdatel'stvo standartov, 1984, 6 p.
- GOST 16745–83.** *Bumaga kondensatornaya. Metod oprede-
leniya probivnogo napryazheniya pri peremennom (chastoty 50 Gts) i
postoyannom napryazhenii (Capacity Paper. Method for Determining
Break-down Voltage at Alternating (frequency 50 Hz.) and Direct
Voltage).* M.: Standartinform, 2006, 6 p.
- GOST 28885–90.** *Kondensatory. Metody izmereniy i ispytaniy
(Capacitors. Methods of Measurements and Tests).* M.: Izdatel'stvo
standartov, 1999, 29 p.
- GOST 18407–73.** *Drevesina. Metod opredeleniya elektricheskoy
prochnosti pri peremennom napryazhenii (Wood. Method for Evaluation
of Electrical Strength at Alternating Voltage).* M.: Izdatel'stvo stan-
dardov, 2000, 3 p.
- ASTM D877 / D877M–19.** Standard Test Method for Dielectric
Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes, ASTM
International, West Conshohocken, PA, 2019.
- ASTM D1816–12 (2019).** Standard Test Method for Dielectric
Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes,
ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- ASTM D1816–04.** Standard Test Method for Dielectric
Breakdown Voltage of Insulating Oils of Petroleum Origin Using VDE
Electrodes, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- ASTM D6871–17.** Standard Specification for Natural
(Vegetable Oil) Ester Fluids Used in Electrical Apparatus, ASTM
International, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM D3300–20.** Standard Test Method for Dielectric
Breakdown Voltage of Insulating Liquids Under Impulse Conditions,
ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.
- ASTM D2225–92.** Standard Test Methods for Silicone
Fluids Used for Electrical Insulation, ASTM International, West
Conshohocken, PA, 1997.
- IEC 60156.** Insulating liquids – Determination of the breakdown
voltage at power frequency – Test method, 2018, International
Electrotechnical Commission (IEC), 2018, 37 p.
- Silikonovaya transformatornaya zhidkost' SOFEKSIL-TSZH.
Rekomendatsii po primeneniyu. Tekhnicheskoe opisaniye i harakteris-
tiki (Silicone Transformer Fluid SOFEKSIL-TSZH. Recommendations
for Use. Technical Description and Characteristics)** [Electron.
Resource], URL: https://www.sofex-silicone.ru/upload/file/pdf/sofexil_tcz.pdf (Date of appeal 27.05.2021).
- Dow Corning 561 Silicone Transformer Liquid.** Technical
manual [Electron. Resource], URL: <https://docplayer.net/21470104-Dow-corning-561-silicone-transformer-liquid.html> (Date of appeal 27.05.2021).

19. **XIAMETER PMX-561 Transformer Liquid**. Polydimethylsiloxane. Technical Data Sheet [Electron. Resource], URL: <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/95/95-4/95-459-01-xiameter-pmx-561-transformer-liquid.pdf?iframe=true> (Date of appeal 27.05.2021).

20. **Chadband W.G., Calderwood J.H.** The Propagation of Discharges in Dielectric Liquids. – Journal of Electrostatics, 1979, vol. 7, No. 9, pp. 75–79.

21. **Watson P.K., Chadband W.G.** The electrical breakdown of viscous silicone fluids. – 9th International Conference

on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, 1987, pp. 381–386.

22. **Watson P.K., Iqbal Qureshi M., Chadband W.G.** The growth of prebreakdown cavities in silicone fluids and the frequency of the accompanying discharge pulses. – IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, vol. 5, No.3, pp. 344–350.

23. **Crine J.** Silicone oil as replacement fluid for PCBs in transformers. – Canadian Electrical Engineering Journal, 1986, vol. 11, No. 3, pp. 110–113.

[23.07.2021]