

Энергетика и электротехника

УДК 537.528

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПОДГОТОВКИ НАНОМАСЛА НА ЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

В.А. Лоскутов, Я.Г. Прокопенко, А.В. Ридель, Л.П. Горева *

Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

E-mail: blackline05@yandex.ru, yakovprokopenko@mail.ru, ridel@corp.nstu.ru, goreva@corp.nstu.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментов, направленных на определение пробивного напряжения жидкостей, содержащих углеродные нанотрубки и другие микровключения, которые были диспергированы в минеральном изоляционном масле, используемом в электрических трансформаторах. Жидкость получали различными способами с обязательным использованием ультразвукового диспергатора. Электрическая прочность наномасла на основе углеродных нанотрубок оказалась значительно меньше электрической прочности наномасла на основе нанооксидов цинка и титана. При малых концентрациях значения электрической прочности примерно соответствуют значениям электрической прочности чистой жидкости, однако с ростом концентрации электрическая прочность всех наножидкостей уменьшается. Показано, что технология приготовления наножидкости оказывает сильное влияние на ее напряжение пробоя.

Ключевые слова: трансформаторное масло, трансформатор, электрическая прочность, диспергирование, углеродные нанотрубки, нанооксид титана, нанооксид цинка, микровключения.

Введение

Для обеспечения безаварийной эксплуатации силовых трансформаторов требуется качественная изоляция со стабильными электрическими параметрами. В России наибольшее распространение в качестве жидкой изоляции получили минеральные масла марок ГК и ВГ. Ряд исследований, направленных на улучшение их электрических характеристик, показывают, что при введении добавок электрическая прочность трансформаторного масла возрастает [1–6], а иногда убывает [7]. Анализ публикаций [1–6] показал, что условия проведения исследо-



© Автор(ы), 2023

* Виктор Александрович Лоскутов, аспирант.

Яков Геннадьевич Прокопенко, студент.

Александр Викторович Ридель, кандидат технических наук, доцент.

Людмила Павловна Горева, кандидат технических наук, доцент.

ваний у различных научных групп отличались. К основным различиям можно отнести: мощность ультразвукового диспергатора, время воздействия, методики измерений и подготовки самих образцов наножидкости. Эти факторы не позволяют однозначно интерпретировать результаты исследований. Таким образом, необходимо изучить условия подготовки проб масла и методику диспергирования для улучшения качества эксперимента и минимизации влияния процесса агломерации. Для оценки электрической прочности наножидкостей использовался высоковольтный испытательный аппарат СКАТ-М100В с латунными электродами и подачей синусоидального переменного напряжения с частотой 50 Гц, в соответствии с ГОСТ 6581-75.

Трансформатор представляет собой ключевой элемент современной электросетевой системы для передачи и распределения электроэнергии. Без него энергосистема просто не смогла бы масштабироваться для удовлетворения растущего спроса на электроэнергию. Он очень важен для обеспечения надежности и безопасности электроэнергетической системы. Большинство трансформаторов, находящихся в эксплуатации во многих странах, приближаются к расчетному сроку службы или превышают его. В связи с этим акцент смещается в сторону улучшения эксплуатационной надежности этих существующих устройств.

Данные по отказам трансформаторов показывают, что средний срок их службы составляет порядка 18 лет, что намного меньше ожидаемого срока службы трансформатора – 35–40 лет. Подчеркнем, что согласно данным [8, 9] около 75 % отказов высоковольтных трансформаторов вызваны проблемами с изоляцией, а именно с состоянием бумажно-масляной изоляции [10–11].

Трансформаторное масло широко используется в силовых установках благодаря своим превосходным электрическим и тепловым характеристикам. Широкое применение минерального масла для высоковольтной изоляции и охлаждения энергетических аппаратов послужило толчком для проведения обширных исследований, направленных на улучшение его электрических характеристик с помощью нанотехнологий. На данный момент исследования теплопроводности жидкостей достаточно углублены и становится ясным, что введение наноматериалов приводит к увеличению теплопроводности. Например, в статье [12] указывается, что добавление оксидов металла в наножидкости с объемной концентрацией частиц 6–8 % приводит к повышению теплопроводности на 15–30 %.

Поскольку масло является средой, отвечающей и за изоляцию, и за охлаждение трансформатора, его эксплуатационные характеристики могут быть улучшены за счет повышения электрической прочности, диэлектрической проницаемости масла и его способности передавать тепло от обмотки трансформатора к его оболочке за счет механизма конвекции. В последнее десятилетие диспергирование наночастиц в базовой жидкости рассматривается как способ модификации свойств жидкости с целью улучшения ее тепловых характеристик [12]. Такие растворы наночастиц в базовой жидкости, предложенные в статье [13], в литературе называются наножидкостями и характеризуются в основном материалом наночастиц, базовой жидкостью, объемной концентрацией наночастиц и наличием поверхностно-активного вещества.

В последнее время проводятся исследования по увеличению электрической прочности путем добавления наночастиц в минеральные масла, используемые в электрических трансформаторах. В работе [14] проведена оценка пробивного напряжения наножидкостей, состоящих из наночастиц TiO_2 и минерального мас-

ла с объемной концентрацией 0,075 %. Согласно полученным результатам, при добавлении в минеральное масло наночастиц TiO_2 пробивное напряжение увеличилось с 67,9 до 80,9 кВ. Такое поведение объясняется в работе тем, что полупроводниковые частицы действуют как ловушки для электронов, вызывая их захват в среде и улучшая диэлектрические характеристики масла. В статье [15] авторы оценили электрическую прочность наножидкостей на основе растворов минерального масла и магнитных частиц железа диаметром около 10 нм. Для стабилизации наножидкости в раствор добавлялись поверхностно-активные вещества. Авторы наблюдали электрическую прочность, более чем в два раза превышающую значение, наблюдаемое для базовой жидкости. При приложении к трансформатору дополнительного внешнего магнитного поля было получено дополнительное увеличение прочности диэлектрика на 30 %. Однако в некоторых работах получены обратные результаты. Например, в статье [7] отмечено, что при увеличении концентрации наночастиц Al_2O_3 электрическая прочность уменьшается, при увеличении концентрации TiO_2 изначально демонстрируется рост электрической прочности при добавлении 2 % наночастиц, а при последующем увеличении концентрации демонстрируется спад; при концентрации в 5 % электрическая прочность оказалась ниже исходной, также при добавлении SiO_2 наблюдалось уменьшение электрической прочности.

Цель работы – выявление факторов, определяющих электрическую прочность жидкой изоляции с микровключениями.

1. Методика экспериментального исследования

Приготовление наножидкостей является первым, ключевым шагом в экспериментальных исследованиях с наножидкостями. Наножидкости – это не просто смеси жидкости и твердого тела. К ним предъявляются некоторые требования, например равномерность и стабильность суспензии, незначительная агломерация частиц, отсутствие химического изменения жидкости и т. д. Наножидкости производятся путем диспергирования твердых частиц нанометрового размера в базовых жидкостях, таких как вода, этиленгликоль, спирт, масла и т. д. При синтезе наножидкостей основной проблемой является агломерация.

Для получения наножидкостей в основном используются два метода: одностадийный и двухстадийный. В первом случае наночастицы получают и диспергируют в масле одновременно, то есть исключаются процессы сушки, хранения и транспортировки наночастиц, что позволяет минимизировать агломерацию и повысить стабильность дисперсии в масле [17]. Так, в серебряных наножидкостях на основе минерального масла, приготовленных одностадийным химическим методом путем разложения лактата кремния в масле, концентрация наночастиц серебра составляла 0,011 и 0,3 об%, причем наночастицы оставались хорошо диспергированными примерно в течение месяца [18]. Однако остатки исходных и промежуточных веществ в наножидкости, образующиеся в результате неполной реакции или стабилизации, могут ограничить применимость одностадийных методов [19].

В двухстадийных методах твердые наночастицы получают химическими или физическими методами, а затем диспергируют в масле-хозяине с помощью магнитного перемешивания, ультразвуковой обработки, перемешивания с высоким сдвигом или шарового размола. Эти методы более широко используются, чем

одностадийные методы, из-за их низкой стоимости и широкого спектра наночастиц, с которыми они совместимы.

Для изучения того, как наноматериалы воздействуют на электрические свойства трансформаторного масла марки ГК, было использовано несколько проб наножидкостей.

1. ОУНТ – одностенные углеродные нанотрубки. Фирма OCSIAL синтезирует одностенные углеродные нанотрубки (SWCNT) нескольких видов, которые отличаются по составу: Tuball 01RW02 (ОУНТ 80 %, углерод графитизированный 5 % и железо 15 %), Tuball 01RW03 (ОУНТ 93 %, углерод графитизированный 6 % и железо 1 %). Отличие 01RW03 от 01RW02 состоит в том, что данные нанотрубки дополнительно очищаются от остатков металлического катализатора, который используется при производстве. Для наших опытов использовались ОУНТ Tuball 01RW03. Диаметр нанотрубки составлял $\approx 1,6 \pm 0,4$ нм, длина ≈ 5 мкм.

2. Нанооксид цинка. Чистота 98 %, остальное – цинк и сорбированные газы O_2 , Ar, N_2 . Размер частиц 20–40 нм.

3. Нанооксид титана. Чистота 99 %. Размер частиц 49 нм. Насыпная плотность 0,5–2 г/см³. Температура плавления 1843 градуса.

Перед добавлением углеродных нанотрубок и иных нановключений масло сушилось с использованием технического силикагеля и фильтровалось.

Первые эксперименты по приготовлению наножидкостей проводились с нанотрубками. Для приготовления проб было взято 400 мл трансформаторного масла марки ГК, к которому добавлялось заранее определенное количество нанотрубок. В экспериментах использовался ультразвуковой диспергатор, мощность которого составляла 1 кВт при диаметре излучателя 33 мм. Для определения оптимальных параметров диспергирования в подготовке исследуемой жидкости было применено несколько методик.

1. С использованием диспергатора 0,002 г углеродных нанотрубок распределялись непосредственно в 200 мл трансформаторного масла в течение 60 мин.

2. С использованием ультразвуковой ванны в спиртовом растворе объемом 50 мл распределялись 0,002 г углеродных нанотрубок в течение 45 мин. Далее полученная смесь приливалась к трансформаторному маслу объемом 200 мл и подвергалась ультразвуковой обработке с использованием диспергатора.

3. С использованием диспергатора 0,002 г углеродных нанотрубок подвергались ультразвуковой обработке в спиртовом растворе объемом 100 мл в течение 45 мин, далее обработанная смесь приливалась к 200 мл масла и диспергировалась на генераторе в течение 45 мин.

4. В этой методике производилось предварительное измельчение нанотрубок с помощью шаровой мельницы в течение времени активации 45 с. Далее готовили образец в соответствии с методикой, описанной в п. 3.

Исследование электрической прочности проводили на установке СКАТ-М100В с измерительной ячейкой объемом 400 мл и полусферическими высоковольтными электродами. В установке СКАТ-М100В расположен стол, на котором находится ячейка с наножидкостью; автоматически после пробоя стол несколько раз опускается вниз и поднимается вверх для удаления продуктов разложения из межэлектродного пространства. Значение зазора между электродами составляло 2,5 мм. Для очистки электродов от углеродных нанотрубок после

каждой серии измерений использовался технический изопропиловый спирт. Затем в измерительную ячейку заливалоcь заранее подготовленное масло с определенной концентрацией нанотрубок, и на нее подавалось напряжение частотой 50 Гц со скоростью нарастания напряжения 2 кВ/с, которая была определена экспериментально. Выдержка между сериями опытов была установлена 10 минут. Задержка между пробоями в каждой серии также была заранее исследована и составляла 5 минут.

2. Результаты

2.1. Измерение напряжения пробоя наножидкости, приготовленной по первой методике

Таблица 1

Напряжение пробоя при диспергировании непосредственно в масле

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	20,2	28,9	42,5	37,8	21,6	19,5	52,3	17,8	28,6
200	45,6	32,8	18,2	68,9	32,5	16,4	27,6	36,4	78,2
300	34,5	45,6	19,7	11,3	14,5	28,7	52,9	34,6	38,7
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	35,9	28,7	18,8	28,9	60,8	34,5	38,9	70,5	28,2
200	19,2	28,6	29,5	61,3	50,8	18,7	23,6	52,1	15,4
300	23,6	67,9	14,9	17,2	9,0	23,4	25,6	38,9	42,1
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее			Среднее отклонение			
100	15,8	45,3	33,75			14,76			
200	19,8	22	34,57			18,5			
300	40,1	18,7	30,09			15,23			

Исходя из табл. 1 можно сделать вывод о том, что диспергирование в масле не дает результата. Погрешность эксперимента составляет порядка 50 %, что не дает никакого представления о влиянии концентрации нанотрубок на минеральное масло.

2.2. Измерение напряжения пробоя наножидкости, приготовленной по второй методике

Исходя из полученных значений напрашивается вывод о том, что при добавлении нанотрубок, во-первых, снижается электрическая прочность, во-вторых, при росте концентрации УНТ происходит более значительное снижение электрической прочности. Кроме того, смесь оказалась нестабильной. Углеродные нанотрубки без поддержания разбитого состояния достаточно быстро слипаются, а в течение дня возвращаются в исходное состояние. Подчеркнем, что в этой серии масло не менялось от пробоя к пробую, просто в малоконцентрированную жидкость после 20 пробоев добавляли более концентрированную в таком количестве, чтобы получилась требуемая концентрация.

Исходя из этой серии опытов было выдвинуто предположение о «старении масла» в связи с большим количеством последовательных пробоев без замены

исходного масла. По данной причине было принято решение о подготовке новой пробы и разового добавления в нее максимальной концентрации 500 мкг/л, а не постепенного, как в прошлой серии опытов.

Таблица 2

Напряжение пробоя при диспергировании в ультразвуковой ванне

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	33,6	37,2	32,3	27,6	26,2	32,1	36,6	34,8	32,7
200	33,4	29,2	31,5	27	31,7	28,9	29,8	32,8	30,5
300	28,7	25,3	24,8	18,4	30,1	25,3	19,6	22,6	30,8
400	26,3	25,4	22,6	28,7	24,6	28,8	10	28,6	26,2
500	23,1	25,2	21,2	18,2	27,7	25,8	26,3	21,7	20,6
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	37,9	34,5	12	13	14	15	16	17	18
200	31,3	30,3	32,7	33,8	29,5	35,1	28,4	32,8	29,6
300	30,1	19,3	28,9	32,6	29,4	27,5	33,9	30,8	32,6
400	28	28	18,9	26,5	21,6	23,9	32,8	24,6	19,9
500	24,2	18,9	28,2	19,9	26,5	24,8	26,7	28,1	23,5
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее			Среднее отклонение			
100	32,1	34,7	32,71			3,16			
200	34,8	34,5	31,07			2,23			
300	28,3	24,5	24,8			4,35			
400	24,8	21,3	25,05			4,35			
500	22,8	20,5	22,54			3,38			

Таблица 3

Напряжение пробоя при разовом добавлении максимальной концентрации

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500	17,6	26,1	27,1	15,6	24,2	24,9	16,8	16	26,3
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	21,4	19,8	25,4	26,4	17,9	22,4	23,9	15,9	18,2
	19	20	Среднее			Среднее отклонение			
	25,1	20,9	21,59			4,06			

Отталкиваясь от полученных значений (табл. 2, 3) можно сделать вывод о том, что электрическая прочность осталась прежней; значит, количество предыдущих пробоев не оказывало влияния.

2.3. Измерение напряжения пробоя наножидкости, приготовленной по третьей методике

Полученные значения (табл. 4) схожи с теми, которые были получены ранее, при диспергировании в ультразвуковой ванне (см. табл. 2). Преимуществом данного метода является то, что для поддержания разбитого состояния наножидкости достаточно было использовать магнитную мешалку, т. к. частицы при обра-

ботке на ультразвуковом генераторе распадаются на более мелкие по сравнению с обработкой в ультразвуковой ванне.

Таблица 4

Напряжение пробоя при обработке на ультразвуковом генераторе

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	33,4	36,4	27,8	29,1	34,9	38,8	37,5	36,6	31,3
200	33,8	32,5	33,9	33,1	31,6	34,2	27,8	30,7	35,9
300	26,1	33,5	34,1	33,1	36,8	34,7	30,5	29,5	31,3
400	32,4	30,8	21,8	25,5	30,9	31,8	25,9	26,4	28,9
500	22,1	28,0	29,1	34,7	16,4	25,6	26,3	22,3	28,7
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	36,2	37,2	38,3	29,8	35,8	31,8	28,8	35,6	36,8
200	33,6	30,6	35,2	33,5	34,7	31,3	34,2	33,2	33,1
300	34,7	32,9	33,9	30,7	34,9	32,1	30,9	34,3	27,4
400	20,9	31,8	26,8	29,1	25,7	30,7	29,3	31,1	28,6
500	21,9	19,8	26,9	23,8	27,3	15,9	25,2	21,2	18,2
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее			Среднее отклонение			
100	29,2	29,8	33,75			3,66			
200	33,5	31,6	32,9			1,86			
300	28,9	32,8	32,15			2,72			
400	27,8	23,8	28			3,39			
500	27,7	25,8	24,34			4,67			

2.4. Измерение напряжения пробоя наножидкости, приготовленной по четвертой методике

Используя данную методику, получили значения (табл. 5), схожие с полученными ранее; следовательно, можно сделать вывод о том, что дополнительная обработка в виде измельчения нанотрубок не требуется.

Таблица 5

Напряжение пробоя после активации измельчения нанотрубок

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	33	35,2	35	29	31,9	29,5	36,3	29,8	34,3
200	29,9	31,9	33,2	31,3	25,1	36,5	30,1	30,8	24,8
300	25,8	15,2	27,5	27,9	33,6	33,3	35,3	26,5	34,0
400	22,8	22,8	28,5	31,3	24,2	27,4	26,9	25,8	27
500	16,8	22,5	17,0	28,3	25,4	27,1	17,6	24,7	29,2
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
100	30	37,8	26,0	32,2	36,0	35,4	31,5	29,6	36,8
200	32,5	30,6	31,4	26,2	25,9	26,6	30,7	31,4	33,8
300	26,8	33,7	15,0	32,4	31,1	24,9	24,3	30,4	26,0
400	30,9	28,2	29,1	28,3	23,2	31,2	27,5	28,0	25,0
500	28,0	27,6	28,3	25,7	29,0	27,8	28,5	28,0	27,6

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
100	34,5	36,9	34,7	29,7	28,2	34,7	35,7	35,1	33,1
200	29,4	22,2	29,5	34,2	27,4	26,8	24,2	30,1	35,6
300	31,1	30,1	20,0	25,3	30,4	31,9	33,3	27,8	27,1
400	24,5	31,7	28,9	29,0	30,9	29,9	21,2	27,2	29,4
500	21,8	21,4	29,8	27,6	27,6	19,2	24,2	27,7	27,0
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	28	29	30	Среднее		Среднее отклонение			
100	34,1	31,4	36,2	33,12		3,04			
200	34,8	33,8	29,2	29,99		3,6			
300	30,8	32,2	30,2	28,46		5,06			
400	22,8	32,4	27,7	27,42		3,02			
500	27,1	16,6	25,1	25,24		4,17			

2.5. Обсуждение результатов

По результатам измерений, представленным в п. 3.1, было установлено, что диспергирование непосредственно в масле не позволяет достичь ожидаемых результатов. Агломераты углеродных нанотрубок диспергируются не в полной степени, что негативно влияет на результаты измерений; в результате этого среднее отклонение имеет значения 43,7 % при 100 мкг/л, 53,5 % при 200 мкг/л и 50,6 % при 300 мкг/л.

По результатам измерений, представленным в п. 3.2, было выявлено, что диспергирование в спирте в ультразвуковой ванне дает результат, но эффект является кратковременным. Углеродные нанотрубки без поддержания разбитого состояния достаточно быстро слипаются, а в течение дня возвращаются в исходное состояние. В целом методика, основанная на поэтапном диспергировании, себя оправдала, так как среднее отклонение составило порядка 13,28 %.

По результатам измерений, представленным в п. 3.3, было получено наиболее стабильное значение электрической прочности, а также нанотрубки более качественно расщеплялись и процесс агломерации происходил дольше. Среднее отклонение составило 11,04 %.

В результате использования методики, описанной в п. 3.4, были получены идентичные значения, поэтому дополнительно измельчать нанотрубки перед подготовкой смеси не требуется.

Как видно, напряжение пробоя с добавлением УНТ всегда оказывалось меньше исходного. Вероятно, это связано с формой частиц – имеют нитевидную форму, диаметр нанотрубки $\approx 1,6 \pm 0,4$ нм, длина ≈ 5 мкм. Такие размеры неизбежно приводят к агломерации, а также к локальному усилению поля у кончиков, поэтому принято решение о проведении дополнительных экспериментов с наночастицами более шарообразной формы.

3. Эксперименты с добавлением наноксидов

3.1. Наноксид титана (TiO₂)

Условия проведения измерения: к 200 мл трансформаторного масла приливался спиртовой раствор, содержащий 0,029 г наноксид титана в 100 мл объема спирта, предварительно диспергированный на ультразвуковом генераторе в те-

чение 45 минут. Далее модифицированная смесь подвергалась ультразвуковой обработке на диспергаторе в течение 45 минут (табл. 6).

Таблица 6

Напряжение пробоя при добавлении наноксид титана

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
75	62,3	59,1	53,9	52,7	51,3	61,3	65,5	50,8	65,7
150	60,1	63,1	59,2	52,6	51,9	58,2	64,3	71,9	51,2
225	54,5	61,3	54,2	57,5	56,1	60,1	58	57,3	52,3
300	58,3	59,1	55,5	50,1	52,3	49,1	57,6	62,3	57,5
450	56,5	54,3	60,2	55,3	59,1	56,7	59,9	56,5	56,3
600	51,4	52,5	56,1	58,9	56,8	53,8	45,8	60,1	52,5
750	50,5	56,2	52,3	54,6	55,7	59,1	44	56,9	62,9
1500	40,1	42,6	43,5	46,5	48,6	41,9	44,4	38,3	38,8
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
75	67,7	56,2	62,9	59,8	52,1	60,3	54,8	59,6	64,8
150	60,5	55,7	57,9	58,9	57,6	60,1	62,3	58,7	60,1
225	48,9	50,1	51,3	54,6	52,1	51,3	54,3	55,6	54,9
300	51,1	57,3	43,3	52,1	53,4	48,7	52,3	56,4	50,2
450	60,7	60,6	61,3	57,6	49,1	60,2	55	54,6	52,7
600	55,3	53,5	49,6	45,8	52,1	54,6	58,1	46,8	49,7
750	42	46,7	55,9	51,2	52,6	48,7	49,6	59,6	51,4
1500	44,9	45,5	62,9	59,8	52,1	60,3	54,8	59,6	64,8
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее		Среднее отклонение				
75	60,1	62,3	59,16		5,16				
150	57,3	52,1	58,68		4,83				
225	60,1	58,7	55,16		3,5				
300	47,9	45,8	53,01		4,9				
450	51,9	57,9	56,82		3,29				
600	52,1	53,6	52,95		4,06				
750	54,6	48,9	52,67		5,25				
1500	38,7	42,4	42,76		3,59				

3.2. Наноксид цинка (ZnO)

Условия проведения измерения: к 200 мл трансформаторного масла приливался спиртовой раствор, содержащий 0,02 г наноксид цинка в 100 мл объема спирта, предварительно диспергированный на ультразвуковом генераторе в течение 45 минут. Далее модифицированная смесь подвергалась ультразвуковой обработке, как в п. 3.1.

По результатам измерений, представленным в п. 3.2, было замечено, что начальное масло имеет значения электрической прочности на 15 % выше, чем в прошлых измерениях. Связано это с тем, что перед данными замерами мы производили дополнительную подготовку масла, а именно фильтровали через двойной слой обеззоленного фильтра класса «синяя лента» и слой силикагеля; фильтрация производилась по 2 раза на каждый образец пробы (табл. 7).

Таблица 7

Напряжение пробоя при добавлении нанooksида цинка

Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Чистое масло	66,7	65,1	78,4	68,6	60,9	69,9	65,3	74,7	69,3
100	76,1	74,2	66,5	68,9	62,2	68,9	73,3	65,8	76,5
200	71,1	68,8	69,5	58,3	71,4	77,9	71,7	72,3	71,9
300	53,7	66,1	69,9	74	62,5	61,9	68,6	70,9	72,5
500	64,7	70,7	63,3	60,5	71,3	73,3	65,1	62,3	70,7
700	62,1	56,9	55,1	56,3	65,1	56,3	65,1	56,7	65,1
900	48,9	53,9	71,9	62,7	67,7	65,5	60,1	57,8	64,1
1200	67,9	56,9	63,5	71,5	65,3	62,7	63,4	72,3	64,9
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Чистое масло	72,9	80	74,5	75,3	77,6	73,9	74,6	75,8	83,7
100	77	74,1	73,4	76,5	68,7	81,8	77,3	77,7	79,5
200	75,5	72,7	67,9	65,8	70,1	73,6	64,9	68,6	70,5
300	54,4	68,1	67,5	65,8	64,5	70,5	64,2	63,9	70,9
500	65,5	67,9	60,5	67,8	65,4	72,6	68,1	63,2	69,1
700	65,7	58,8	63,2	58,9	62,3	60,5	62,3	71,6	58,7
900	55,8	57,1	49,1	59,4	49,7	51,9	53,7	64,5	49,8
1200	52,1	65,9	65,1	64,2	58,7	59,6	54,3	52,8	59,4
Концентрация, мкг/л	Напряжение пробоя, кВ								
	19	20	Среднее		Среднее отклонение				
Чистое масло	68,9	75,6	72,58		5,6				
100	59,8	75,4	72,68		5,86				
200	69,7	61,5	69,85		4,51				
300	62,1	64,3	65,81		5,35				
500	67,3	66,5	66,79		3,78				
700	54,6	60,4	60,78		4,37				
900	60,8	58,7	58,15		6,63				
1200	68,1	49,1	59,51		6,4				

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Электрическая прочность наномасла на основе углеродных нанотрубок значительно меньше электрической прочности наномасла на основе оксидов цинка и титана. На наш взгляд, это связано с формой наночастиц.
2. С ростом концентрации электрическая прочность всех наножидкостей уменьшается.
3. При малых концентрациях значения электрической прочности примерно соответствуют значениям электрической прочности чистой жидкости.
4. Технология приготовления наножидкости оказывает сильное влияние на ее напряжение пробоя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Potao S., Wenxia S., Dingfei Z., Qiulin C., Lian Y., Jiaqi C.* Effects of impulse waveform parameters on the breakdown characteristics of nano-TiO₂ modified transformer oil // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. Vol. 25. No. 5. Pp. 1651–1659.
2. *Gaurav S., Hemantkumar A.* Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015. Vol. 22. No. 4. Pp. 2185–2190.
3. *Abid M.A., Khan I., Ullah Z., Ullah K., Haider A., Ali S.M.* Dielectric and Thermal Performance Up-Gradation of Transformer Oil Using Valuable NanoParticles // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. Pp. 153509–153518.
4. *Swati K., Sarathi R., Yadav K.S., Taylor N., Edin H.* Corona discharge activity in nanoparticle dispersed transformer oil S. K. under composite voltages // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. Vol. 25. No. 5. Pp. 1731–1738.
5. *Potao S., Wenxia S., Xiongwei J., Dingfei Z., Jiahui H., Qiulin C.* Failure of nano-modified oil impregnated paper under repeated impulse voltage: Effects of TiO₂ nanoparticles on space charge characteristics // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. Vol. 25. No. 8. Pp. 2103–2111.
6. *Dhar P., Katiyar A., Maganti L.S., Pattamatta A., Das S.* Superior dielectric breakdown strength of graphene and carbon nanotube infused nano-oils // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016. Vol. 23. No. 2. Pp. 943–956.
7. *Yuzhen L., Chengrong L.* A Review on Properties, Opportunities, and Challenges of Transformer Oil-Based Nanofluids Muhammad Rafiq // *Journal of Nanomaterial*. 2016. Vol. 2016. Pp. 23–47.
8. ГОСТ 6581-75 Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний.
9. *Bartley W.H.* Investigating transformer failure // In *Proceedings of the 5th Weidmann-ACTI Annual Technical Conference on New Diagnostic Concepts for Better Asset Management*, 2006. Pp. 1–14. <http://www.sciepub.com/reference/179122> (accessed October 10, 2023).
10. *Rafiq M.* Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications // *Transformer Life Extension*. 2020. Vol. 25. Pp. 36–41. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7503315/> (accessed October 10, 2023).
11. *Chiesa M., Das K.* Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2009. Vol. 335. Pp. 88–97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775708007322> (accessed October 10, 2023).
12. *Rouse T.O.* Mineral insulating oil in transformers // *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1998. Vol. 14. Pp. 6–16. <https://ieeexplore.ieee.org/document/675572> (accessed October 10, 2023).
13. *Рудяк В.Я., Минакова А.В., Пряхников М.И., Гузей Д.В.* Измерение теплопроводности и коэффициента теплоотдачи наножидкостей с одностенными нанотрубками // *Теплофизика высоких температур*. 2022. № 5. С. 692–700.
14. *Choi S., Eastman J.A.* Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles // *ASME, International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, San Francisco, CA, 1995.
15. *Du Y., Lv Y., Li C., Chen M., Zhong Y., Zhou J.* Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2012. Pp. 770–776.
16. *Lee J., Kim W.* Experimental study of dielectric breakdown voltage of insulating oil mixed with magnetic nanoparticles // *Phys. Procedia*. 2012. Vol. 32. Pp. 327–334.
17. *Nemati A.* Recent Advances in Nanofluids Based on Transformer Oil: Preparation and Electrical Insulation Properties // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2021. Vol. 28. Pp. 702–711. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6882597> (accessed October 10, 2023).
18. *Bonnemann H.* Monodisperse copper and silver-nanocolloids suitable for heat-conductive fluids // *Appl. Organomet. Chem.* 2005. Vol. 19. Pp. 768–773. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aoc.889> (accessed October 10, 2023).

19. *Yu W., Xie H.Q.* A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications // Journal of Nanomaterial. 2011. Vol. 2012. <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/435873/> (accessed October 10, 2023).
20. *Ржевская С.П.* Электрические материалы. Диэлектрики. Минск: БИТУ, 2009. 142 с.
21. *Николаев М.Ю., Мальгин Г.В., Щекочихин А.В., Шкаруба М.В.* Электротехнические и конструкционные материалы. Нижневартовск: НВГУ, 2022. 167 с.
22. *Воробьев Г.А.* Диэлектрические свойства электроизоляционных материалов. Томск: Томск. ун-т, 1984. С. 69–73.
23. ГОСТ Р 56738-2015 Трансформаторы силовые. Требования и методы испытания электрической прочности.
24. *Барбашова Г.А., Шомко В.В.* Влияние цикличности ввода электрической энергии в канал подводного искрового разряда // Инженерия поверхности и прикладная электрохимия. 2007. Т. 43. № 2. С. 43–49.
25. *Хренников А.Ю., Батяев Р.Ю., Мажурин Ю.В.* Аварийность высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения в электрических сетях 110–750 кВ и мероприятия по ее снижению // Электро. Электроника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2011. № 6. С. 44–46.
26. *Кизеветов Д.В., Резник А.С., Журавлева Н.М., Литвинов Д.В.* Влияние концентрации компонентов смеси диэлектрических жидкостей для силовых трансформаторов на электрическое сопротивление и оптические характеристики // Глобальная энергия. 2020. № 3. С. 5–19.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2023 г.

INFLUENCE OF NANO-OIL PREPARATION CONDITIONS ON ITS ELECTRICAL STRENGTH

V.A. Loskutov, Y.G. Prokopenko, A.V. Rydel, L.P. Goreva*

Novosibirsk State Technical University
20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

E-mail: blackline05@yandex.ru, yakovprokopenko@mail.ru, ridel@corp.nstu.ru, goreva@corp.nstu.ru

Abstract. *This study presents the results of experiments aimed at determining the breakdown voltage of liquids containing carbon nanotubes and other microinclusions, which were dispersed in mineral insulating oil used in electrical transformers. The liquid was obtained by various methods with the mandatory use of ultrasonic dispersant. The electrical strength of the carbon nanotube-based nano-oil was found to be significantly less than the electrical strength of the zinc and titanium nano-oxide-based nano-oil. At low concentrations the values of electrical strength approximately correspond to the values of electrical strength of pure liquid, but with increasing concentration the electrical strength of all nanofluids decreases. It is shown that the nanofluid preparation technology has a strong influence on its breakdown voltage.*

Keywords: *Transformer oil, transformer, electrical strength, dispersion, carbon nanotubes, titanium nanooxide, zinc nanooxide, microinclusions.*

REFERENCES

1. Potao S., Wenxia S., Dingfei Z., Qiulin C., Lian Y., Jiaqi C. Effects of impulse waveform parameters on the breakdown characteristics of nano-TiO₂ modified transformer oil // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 5. Pp. 1651–1659.
2. Gaurav S., Hemantkumar A. Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22. No. 4. Pp. 2185–2190.
3. Abid M.A., Khan I., Ullah Z., Ullah K., Haider A., Ali S.M. Dielectric and Thermal Performance Up-Gradation of Transformer Oil Using Valuable NanoParticles // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 153509–153518.
4. Swati K., Sarathi R., Yadav K.S., Taylor N., Edin H. Corona discharge activity in nanoparticle dispersed transformer oil S. K. under composite voltages // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 5. Pp. 1731–1738.
5. Potao S., Wenxia S., Xiongwei J., Dingfei Z., Jiahui H., Qiulin C. Failure of nano-modified oil impregnated paper under repeated impulse voltage: Effects of TiO₂ nanoparticles on space charge characteristics // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2018. Vol. 25. No. 8. Pp. 2103–2111.
6. Dhar P., Katiyar A., Maganti L.S., Pattamatta A., Das S. Superior dielectric breakdown strength of graphene and carbon nanotube infused nano-oils // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016. Vol. 23. No. 2. Pp. 943–956.



© The Author(s), 2023

*Viktor A. Loskutov, Postgraduate Student.

Yakov G. Prokopenko, Student.

Alexander V. Rydel, (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Ludmila P. Goreva, (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

7. *Yuzhen L., Chengrong L.* A Review on Properties, Opportunities, and Challenges of Transformer Oil-Based Nanofluids Muhammad Rafiq // *Journal of Nanomaterial.* 2016. Vol. 2016. Pp. 23–47.
8. GOST 6581-75 Materialy elektroizolyacionnye zhidkie. Metody elektricheskikh ispytaniy [Electrically insulating liquid materials. Methods of electrical tests]. (In Russian).
9. *Bartley W.H.* Investigating transformer failure // In *Proceedings of the 5th Weidmann-ACTI Annual Technical Conference on New Diagnostic Concepts for Better Asset Management*, 2006. Pp. 1–14. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775708007322> (accessed October 10, 2023).
10. *Rafiq M.* Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications // *Transformer Life Extension*. 2020. Vol. 25. Pp. 36–41. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7503315/> (accessed October 10, 2023).
11. *Chiesa M., Das K.* Experimental investigation of the dielectric and cooling performance of colloidal suspensions in insulating media // *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2009. Vol. 335. Pp. 88–97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927775708007322> (accessed October 10, 2023).
12. *Rouse T.O.* Mineral insulating oil in transformers // *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1998. Vol. 14. Pp. 6–16. <https://ieeexplore.ieee.org/document/675572> (accessed October 10, 2023).
13. *Rudiyak V.Ya., Minakova A.V., Pryazhnikov M.I., Guzey D.V.* Izmerenie teploprovodnosti i koeffitsienta teplootdachi nanozhdikostej s odnostennymi nanotrubkami [Measurement of thermal conductivity and heat transfer coefficient of nanozhdiches with single-walled nanotubes] // *Thermophysics of high temperatures*. 2022. No. 5. Pp. 692–700. (in Russian).
14. *Choi S., Eastman J.A.* Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles // *ASME, International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, San Francisco, CA, 1995.
15. *Du Y., Lv Y., Li C., Chen M., Zhong Y., Zhou J.* Effect of semiconductive nanoparticles on insulating performances of transformer oil // *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2012. Pp. 770–776.
16. *Lee J., Kim W.* Experimental study of dielectric breakdown voltage of insulating oil mixed with magnetic nanoparticles // *Phys. Procedia*. 2012. Vol. 32. Pp. 327–334.
17. *Nemati A.* Recent Advances in Nanofluids Based on Transformer Oil: Preparation and Electrical Insulation Properties // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2021. Vol. 28. Pp. 702–711. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6882597> (accessed October 10, 2023).
18. *Bonnemann H.* Monodisperse copper and silver-nanocolloids suitable for heat-conductive fluids // *Appl. Organomet. Chem.* 2005. Vol. 19. Pp. 768–773. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aoc.889> (accessed October 10, 2023).
19. *Yu W., Xie H.Q.* A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications // *Journal of Nanomaterial.* 2011. Vol. 2012. <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/435873/> (accessed October 10, 2023).
20. *Rzhevskaya S.P.* Elektricheskie materialy. Dielektriki [Electrical Materials. Dielectrics]. Minsk: BITU, 2009. 142 p. (in Russian).
21. *Nikolaev M.Yu., Malgin G.V., Shchekochikhin A.V., Shkaruba M.V.* Elektrotekhnicheskie i konstrukcionnye materialy [Electrotechnical and structural materials]. Nizhnevartovsk: NVGU, 2022. 167 p. (in Russian).
22. *Vorobyev G.A.* Dielektricheskie svoystva elektroizolyacionnykh materialov [Dielectric properties of electrical insulating materials]. Tomsk: Tomsk University Publishing House, 1984. Pp. 69–73. (in Russian).
23. GOST P 56738-2015 Transformatory silovye. Trebovaniya i metody ispytaniya elektricheskoy prochnosti [Power transformers. Requirements and test methods for electrical strength]. (in Russian).
24. *Barbashova G.A., Shomko V.B.* Vliyanie ciklichnosti vvoda elektricheskoy energii v kanal podvodnogo iskrovogo razryada [Influence of the electric energy input cycling into the underwater spark discharge channel] // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007. Vol. 43. № 2. Pp. 43–49. (in Russian).
25. *Hrennikov A.Yu., Batyaev R.Yu., Mazhurin Yu.V.* Avarijnost' vysokovol'tnykh izmeritel'nykh transformatorov toka i napryazheniya v elektricheskikh setyah 110-750 kV i meropriyatiya po eyo snizheniyu [Accident rate of the high-voltage measuring current and voltage transformers

- in the 110-750 kV electrical networks and measures to reduce it] // Elektro. Elektronika, Elektroenergetika, Elektrotechnical Industry. 2011. No. 6. Pp. 44–46 (in Russian).
26. Kizevetov D.V., Reznik A.S., Zhuravleva N.M., Litvinov D.V. Vliyanie koncentracii komponentov smesi dielektricheskikh zhidkostej dlya silovykh transformatorov na elektricheskoe soprotivlenie i opticheskie harakteristiki [Influence of dielectric fluid mixture components concentration for power transformers on electrical resistance and optical characteristics] // Global Energy. 2020. No. 3. Pp. 5–19. (in Russian).

Original article submitted 10.10.2023