

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.321

Ольга Сергеевна Мельникова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Михаил Вячеславович Прусаков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, e-mail: mprab3@mail.ru

Александр Алексеевич Жолобов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологии, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-03.

Исследование влияния волокон целлюлозы на электрическую прочность трансформаторного масла

Авторское резюме

Состояние вопроса. Электрическая прочность трансформаторного масла является первым параметром при испытаниях изоляции трансформаторов. Такие испытания производятся в стандартном разряднике по значениям пробивных напряжений. Резкое снижение электрической прочности имеет место при загрязнении масла механическими примесями. Наибольшее влияние на напряженность электрического поля оказывают волокна целлюлозы, которые обладают повышенной проводимостью, образование мостика из них особенно сильно искажает поле между электродами. В то же время влияние таких частиц не учитывается при испытаниях. Сложность заключается в том, что экспериментально трудно определить влияние таких примесей на пробивную напряженность. В связи с этим в исследованиях поставлены и решены задачи по определению электрической прочности трансформаторного масла в стандартном разряднике при наличии волокон целлюлозы.

Материалы и методы. Для моделирования напряженностей электрического поля использован программный комплекс ANSYS. За основу 3D модели была принята стандартная измерительная ячейка для определения пробивного напряжения, построенная с учетом граничных условий в форме куба, в котором находится электродная система, и учитывающая значения напряженности электрического поля в центре электродной системы.

Результаты. Проведены расчеты напряженности электрического поля между электродами с учетом влияния повышенной проводимости волокон целлюлозы. Показано существенное влияние на снижение электрической прочности масляных промежутков увлажненных волокон длиной более 200 мкм, что при проведении испытаний трансформаторного масла на пробой в стандартной ячейке не учитывается и приводит к снижению точности результатов определения электрической прочности трансформаторного масла в действующем оборудовании.

Выводы. Результаты исследования могут быть использованы эксплуатационными службами для улучшения оценки качества трансформаторного масла, используемого в силовых трансформаторах в качестве изоляции. Также полученные результаты могут быть использованы при исследованиях механизмов электрофизических процессов, происходящих в жидких диэлектриках, при наличии волокон.

Ключевые слова: трансформаторное масло, пробивное напряжение, электрическая прочность, напряженность электрического поля, волокна целлюлозы

Olga Sergeevna Melnikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor of the high-voltage electric power engineering, electrotechnics and electrophysics department (HvETP), Russia, Ivanovo, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Mikhail Vyacheslavovich Prusakov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate professor of the high-voltage electric power engineering, electrotechnics and electrophysics department (HvETP), Russia, Ivanovo, e-mail: mprab3@mail.ru

Alexander Alekseyevich Zholobov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student of the Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnology, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-03.

Study of the effect of cellulose fibers on the electrical strength of transformer oil

Abstract

Background. The electrical strength of transformer oil is the first parameter in transformer insulation tests. Such tests are carried out in a standard discharger according to the values of breakdown voltage. An abrupt decrease in electrical strength occurs when oil is contaminated with mechanical impurities. The greatest influence on the electric field is exerted by highly conductive cellulose fibers. The field between the electrodes may be severely distorted by a «bridge» of such fibers. At the same time, the influence of such particles is not taken into account in the tests. The problem is to experimentally determine the effect of such impurities on the breakdown strength. Thereby, this research poses and solves the problem of determining the dielectric strength of transformer oil in a standard discharger in the presence of cellulose fibers.

Materials and methods. To simulate electric field strengths, the ANSYS software package has been used. The basis of the 3D model was a standard measuring cell for determining breakdown voltage, which takes into account the boundary conditions in the form of a cube in which the electrode system is located, and the values of the electric field strength in the center of the electrode system.

Results. The electric field tension between the electrodes has been calculated, taking into account the influence of increased conductivity of cellulose fibers. It has been found that the electrical strength of oil gaps of moistened fibers with a length of more than 200 μm is significantly reduced, which is not taken into account when testing transformer oil for breakdown in a standard cell. This leads to inaccuracy in determining the electric strength of transformer oil in existing equipment.

Conclusions. The results of the study can be used by operational services to improve the assessment of the quality of transformer oil used in power transformers as insulation. The results also can be used to study the mechanisms of electrophysical processes occurring in liquid dielectrics in the presence of fibers.

Key words: transformer oil, breakdown voltage, electric strength, electric field strength, cellulose fiber

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.4.023-033

Введение. Электрическая прочность трансформаторного масла – один из важных параметров при диагностике изоляции силовых трансформаторов [1]. Нарушение электрической прочности маслобарьерной изоляции приводит к необратимым последствиям работы трансформатора в целом [2, 3]. В соответствии с РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний

электрооборудования»¹, определение среднего пробивного напряжения является первым параметром при испытаниях трансформаторного масла. Такие испытания производятся в стандартном разряд-

¹ РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под ред. Б.А. Алексева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – Изд. 6-е, с изм. и доп. – М.: НЦ ЭНАС, 2004.

нике по значениям пробивных напряжений в соответствии с ГОСТ 6581-75². Кроме того, по ГОСТ 6581-75 определяется коэффициент вариации, который показывает разброс значений пробивных напряжений относительно среднего значения. Коэффициент вариации, в соответствии с ГОСТ 6581-75, определяется для всех электротехнических жидкостей, и его значение не должно превышать 20 %, в то время как для технически чистого трансформаторного масла этот коэффициент составляет 10–15 % [4]. В соответствии с американским стандартом ASTM D1816-67 (1971)³, который предусматривает определение пробивных напряжений только для нефтяных масел, этот коэффициент составляет 6 % [5]. Механизм пробоя трансформаторного масла имеет статистический характер, и, например, если значения пробивного напряжения соответствуют нормативным значениям, а коэффициент вариации имеет достаточные значения, это говорит о наличии механических примесей в трансформаторном масле [6].

На пробивное напряжение трансформаторного масла оказывают влияние как размер частиц, так и их проводимость и диэлектрическая проницаемость. Наличие твердых примесей сильно снижает пробивное напряжение трансформаторного масла. Твердые частицы, диэлектрическая проницаемость которых больше диэлектрической проницаемости масла, втягиваются в область наиболее сильного поля, образуют мостики, которые способствуют пробоям. Наличие частиц, мостиков и отдельных цепочек сильно искажает поле между электродами, и пробой трансформаторного масла происходит в резко неоднородном поле, что ведет к снижению пробивного напряжения [7].

Наибольшее влияние на напряженность электрического поля оказывают проводящие металлические частицы, однако наиболее распространенными механическими частицами примесей являются

увлажненные волокна и графит (углерод). Волокна в трансформаторном масле появляются из-за отрыва частиц от твердых барьеров из электротехнического картона на стадиях изготовления, а также в процессе эксплуатации трансформаторов при непрерывной циркуляции масла и при старении изоляции.

Если жидкость сильно загрязнена твердыми частицами, то образование мостика происходит сравнительно быстро, за время около секунды или нескольких секунд. Резкое снижение электрической прочности имеет место при загрязнении жидкости влажными волокнами. Такие волокна обладают повышенной проводимостью, образование мостика из них особенно сильно искажает поле между электродами. Если мостик соприкасается с одним из электродов, это приводит к уменьшению расстояния между электродами. В случае сухих волокон мостики имеют высокое сопротивление и в меньшей степени влияют на пробивное напряжение [7].

Определение допустимой пробивной напряженности на стадии проектирования трансформаторов в настоящее время определяется на моделях и сравнивается с расчетными значениями [8, 9], при этом влияние других факторов, таких как наличие примесей, не учитывают. Сложность заключается в том, что экспериментально трудно определить влияние номинальных напряжений и мощности трансформаторов, примесей на электрическую прочность масла и изоляции в целом, учесть объем масла между электродами. В настоящее время успехи в области развития численных методов расчетов электрических полей с применением компьютерных технологий позволяют рассчитать с достаточно высокой точностью заданные модели. Для расчетов электрической прочности трансформаторного масла в нашем исследовании использован программный комплекс ANSYS. В основе этой программы заложен численный метод конечных элементов, позволяющий рассчитать значения электрического поля в любой точке заданной геометрии [10].

В связи с этим в исследованиях поставлены и решены задачи по определению напряженности электрического поля в стандартном разряднике при наличии сухих и увлажненных волокон в зависимости от их размера, проводимости и расположения

² ГОСТ 6581-75 (СТ СЭВ 3166-81). Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998.

³ ASTM D1816-67 (1971, США). Метод определения пробивного напряжения нефтяных электроизоляционных масел с помощью VDE-электродов / Сборник стандартов США по испытанию электроизоляционных материалов // перевод с англ. под ред. проф. Н.В. Александрова. – М.: Энергия, 1979.

относительно электродов, а также смоделированы цепочки из волокон в трансформаторном масле.

Методика исследования. За основу 3D модели принята стандартная измерительная ячейка для определения пробивного напряжения, геометрические размеры которой определены в соответствии с ГОСТ 6581-75. Сечение системы создано в AutoCAD (двух- и трехмерная система автоматизированного проектирования и черчения). Моделирование системы проведено в программном обеспечении Autodesk Inventor – система трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического проектирования (САПР), предназначенная для создания цифровых прототипов промышленных изделий. Для импорта в среду ANSYS Maxwell модель была упрощена. Оставлены только электроды. Это

возможно благодаря тому, что интересующие значения напряженности электрического поля находятся в центре электродной системы [7]. Для экспорта системы использован формат.sat (Standard ACIS Text). Файлы данного формата хранятся в текстовом формате ASCII. После импортирования модели в ANSYS Maxwell были заданы граничные условия в форме куба, в котором находится электродная система (рис. 1). Всем элементам заданы электрофизические характеристики соответствующих материалов, представленных в табл. 1. Электроды выполнены из меди. Куб вокруг электродов заполнен трансформаторным маслом. Марка трансформаторного масла ГК – наиболее часто применяемая в электрооборудовании высших классов напряжения.

Таблица 1. Электрофизические характеристики моделируемых трансформаторного масла и частиц

Материалы	Электрофизические характеристики	
	ϵ_r	ρ , Ом·м
Трансформаторное масло (ГК)	2,2	10^{12}
Волокна целлюлозы (картон для главной изоляции марки А) при $c_B = 1\%$	4	10^{12}
Волокна целлюлозы (картон для главной изоляции марки А) при $c_B = 6\%$	12	10^{10}

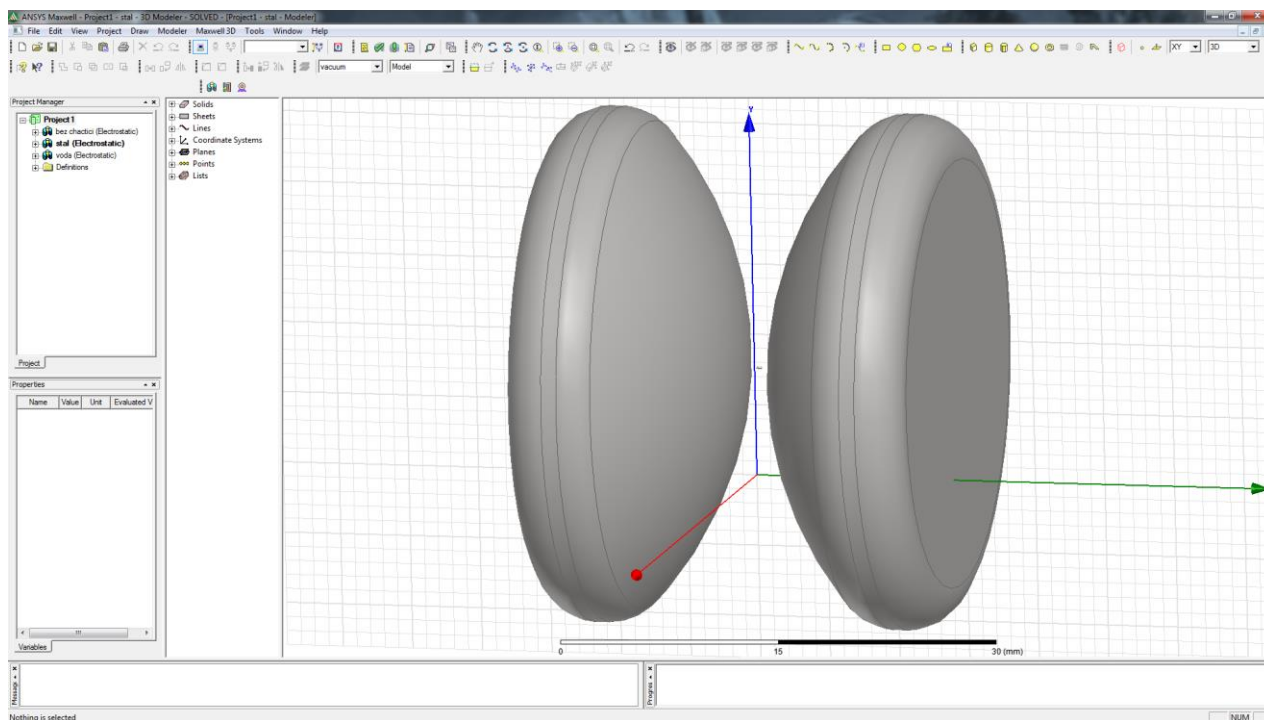


Рис. 1. Электродная система стандартного разрядника в среде ANSYS Maxwell

Между электродами системы располагались различные частицы. Были рассмотрены два типа волокон целлюлозы: увлажненные и сухие. Одному из электродов присвоено значение напряжения 40 кВ. Это напряжение является средним пробивным в стандартной измерительной ячейке для оборудования класса до 150 кВ в соответствии с РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования». Принятое в данных расчетах значение напряжения 40 кВ является таковым для эксплуатационного масла, допускаемого в работу в электрооборудовании в качестве изоляции. Второй электрод заземлен и напряжение на нем 0 кВ.

Для получения полной картины влияния частиц примесей на электрическое поле оценивалась напряженность в промежутке между электродами без частиц (рис. 2).

По графику, представленному на рис. 2, можно принять, что вдоль центральной оси системы поле слабо неоднородное. Значения от 0,5 до 3 мм – это напряженность электрического поля в трансформаторном масле. До и после этих значений находятся медные электроды, внутри медных электродов поле отсутствует [10]. Максимальная расчетная напряженность электрического поля достигает 16,62 кВ/мм у поверхности электрода с потенциалом 40 кВ.

Для того чтобы убедиться в достоверности результатов, полученных в ANSYS Maxwell, можно рассчитать предельно до-

пустимое среднее значение напряженности в системе с однородным электрическим полем. Напряжение – $U = 40$ кВ, расстояние между электродами в испытательной ячейке – $d = 2,5$ мм. Тогда

$$E_{\text{пр.доп}} = \frac{U}{d} = \frac{40}{2,5} = 16 \text{ кВ/мм} . \quad (1)$$

Результаты, полученные при расчете и моделировании, совпадают. Значит, можно считать модель достоверной. Для полного понимания необходимо провести расчет и по максимальным пробивным напряжениям.

Чистое трансформаторное масло может иметь напряжение пробоя вплоть до 80 кВ. Таким образом, его пробивная напряженность при пересчете по (1) составляет

$$E_{\text{max}} = \frac{U}{d} = \frac{80}{2,5} = 32 \text{ кВ/мм} . \quad (2)$$

Таким образом, при превышении E_{max} в промежутке будет пробой изоляции даже при меньшем напряжении (т.е. появление частицы может сильно повлиять на электрическую прочность).

Для исследования влияния волокон были созданы модели электродных систем с частицами разных размеров и при разном их положении между электродами, а также созданы модели с так называемыми цепочками, состоящими из волокон целлюлозы.

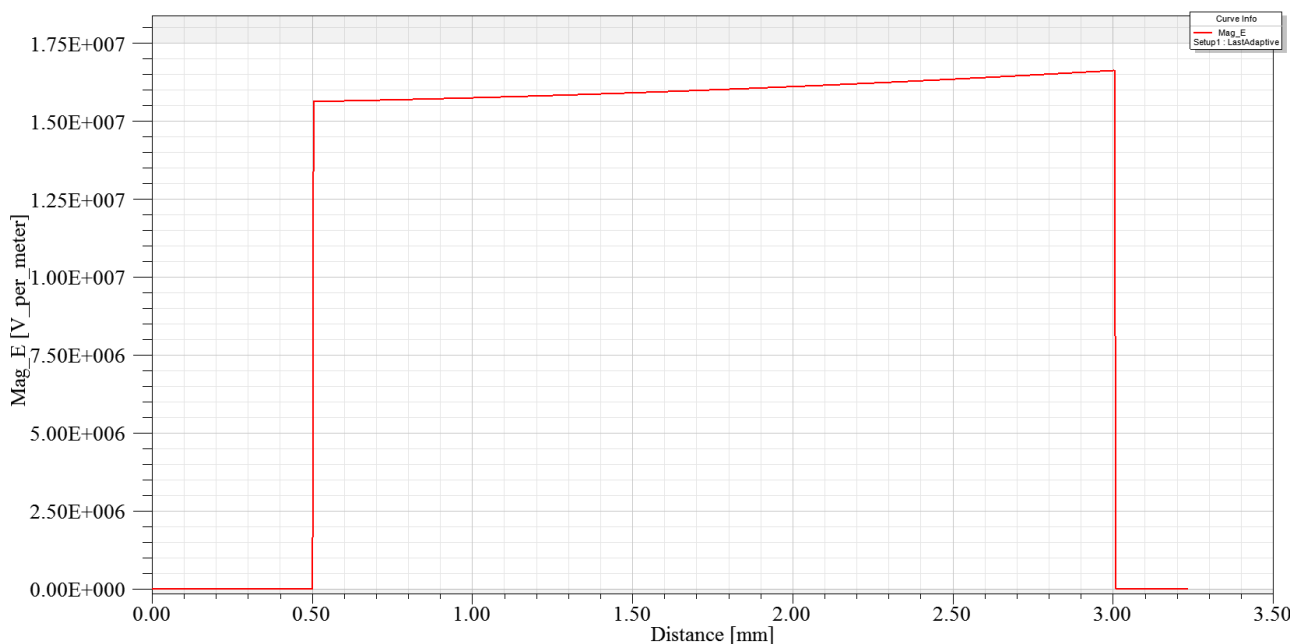


Рис. 2. Расчетный график напряженности поля вдоль оси системы без частиц

Для оценки влияния волокон целлюлозы были рассмотрены частицы при концентрации воды $C_B = 1\%$ (сухие волокна) и $C_B = 6\%$ (увлажненные волокна) и длина волокон изменялась от 100 до 400 мкм в соответствии с ГОСТ 17216-2001.

Результаты исследования. На рис. 3 представлен график изменения напряженности поля при наличии влажного волокна 400 мкм в середине электродной системы. Анализ графика показывает, что после введения частицы электрическое поле становится резко неоднородным; максимальная напряженность электрического поля наблюдаются на границе раздела жидкого диэлектрика и частицы.

Напряженность электрического поля вблизи электродов возросла, что не наблюдается в системе без частиц. Напряженность внутри частицы также присутствует.

Значения максимальной, средней и минимальной напряженностей электриче-

ского поля при расположении частицы в центре между электродами системы для сухих и увлажненных волокон представлены в табл. 2.

Анализ полученных результатов моделирования (рис. 4, 5) показывает, что увеличение максимальных значений напряженности над средней напряженностью (16 кВ/мм) чистого масляного промежутка у концов сухих волокон длиной 100 мкм составляет 23,88 %, 200 мкм – 46,44 %, 400 мкм – 46,69 %. Таким образом, сухие волокна длиной более 200 мкм слабо влияют на искажение напряженности электрического поля.

Увеличение максимальных значений напряженности над средней у концов влажных волокон длиной 100 мкм составляет 64 %, 200 мкм – 170,13 %, 400 мкм – 209,38 %. Здесь также отмечается снижение темпов роста напряженности электрического поля для волокон длиной более 200 мкм.

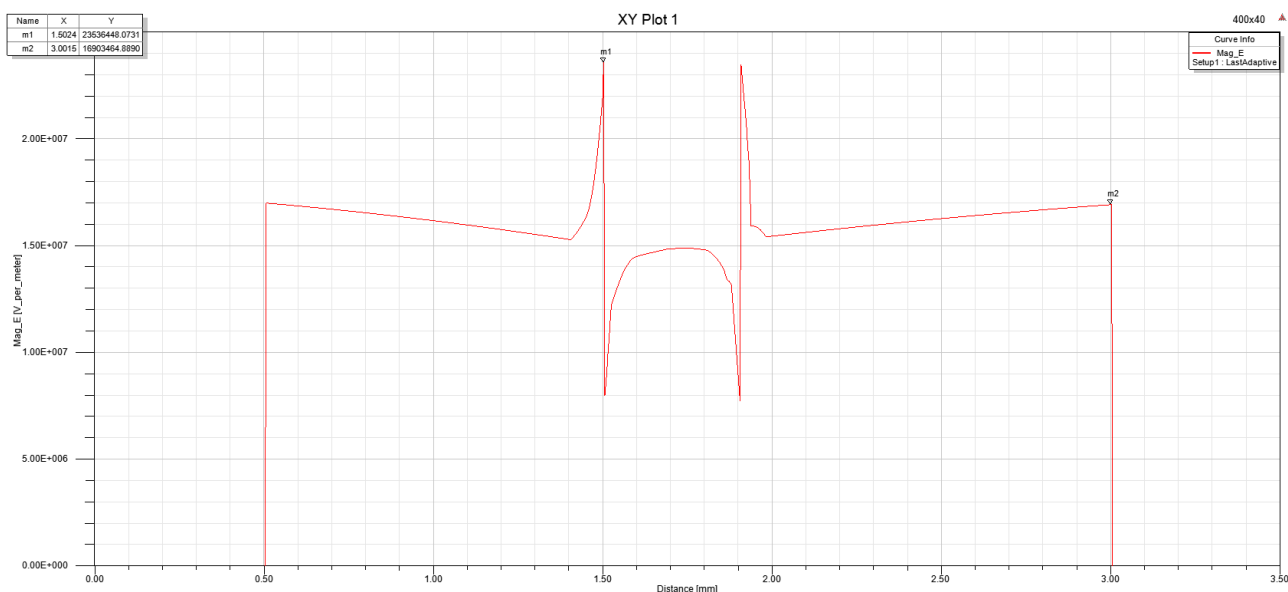
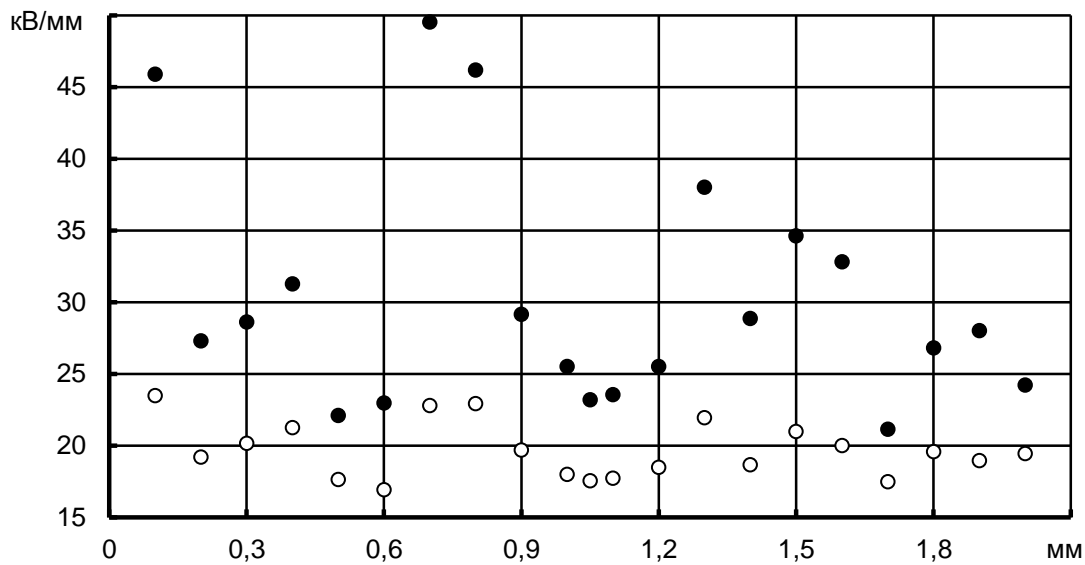


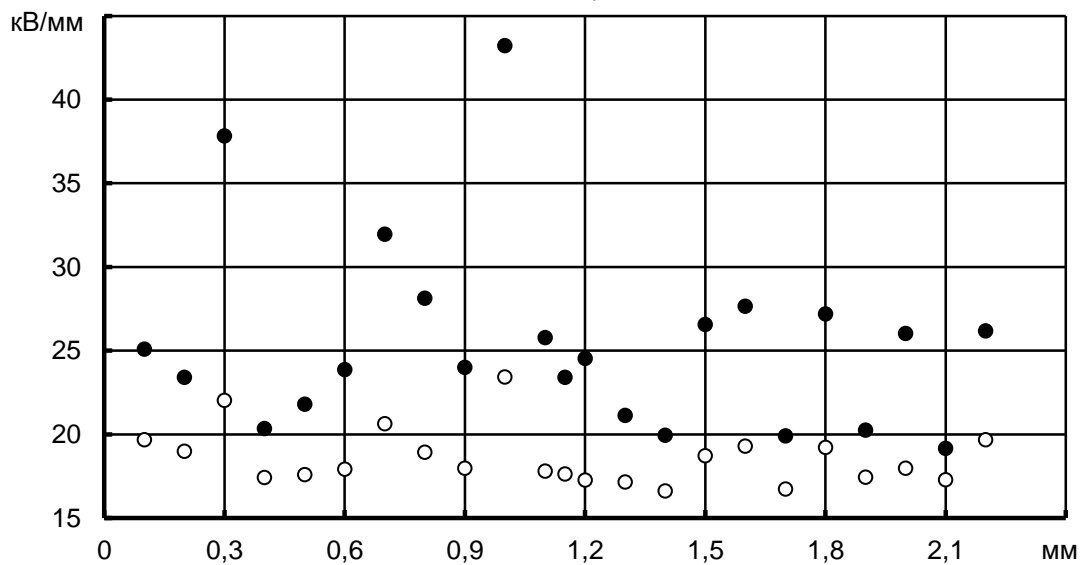
Рис. 3. Изменения напряженности поля при наличии влажного волокна 400 мкм, полученные в системе ANSYS Maxwell

Таблица 2. Значения напряженности поля при наличии волокон

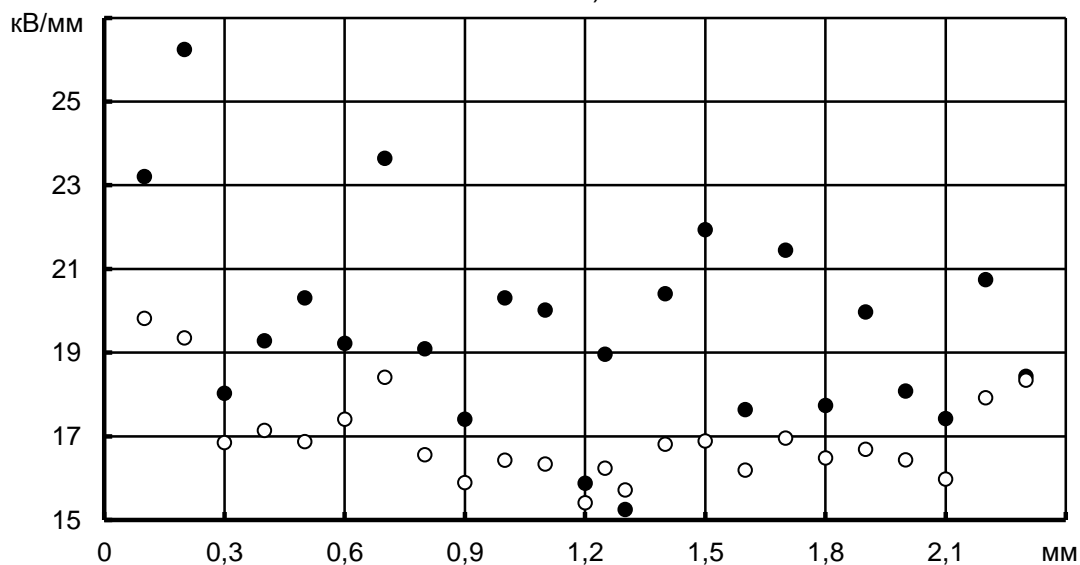
Длина волокна, мкм	Состояние волокна	E_{cp} , кВ/мм	E_{max} , кВ/мм	E_{min} , кВ/мм
400	Влажное	30,24	49,5	21,14
	Сухое	19,65	23,47	16,91
200	Влажное	25,54	43,22	19,16
	Сухое	18,59	23,43	16,63
100	Влажное	19,61	26,24	15,88
	Сухое	16,96	19,82	15,41



а)



б)



в)

Рис. 4. Изменение максимального значения напряженности поля около волокна при различном его местоположении в промежутке относительно электрода 40 кВ: • – влажное волокно; ◦ – сухое волокно; а – волокно длиной 400 мкм; б – 200 мкм; в – 100 мкм

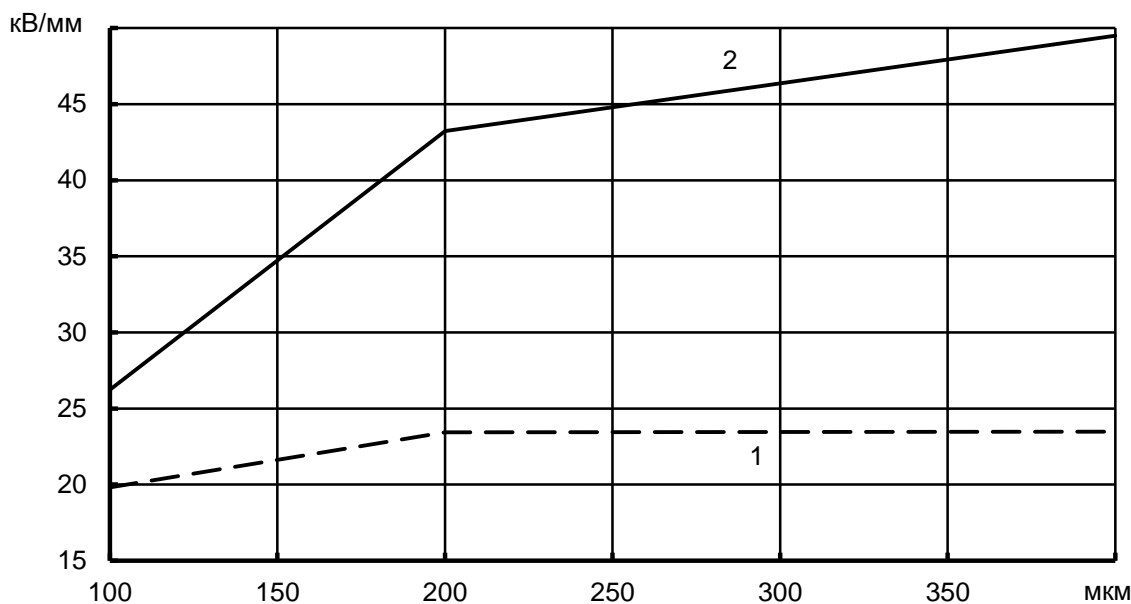


Рис. 5. Зависимость максимальной напряженности от длины волокон: 1 – сухое волокно; 2 – влажное волокно

Увлажнение волокон в 6 раз (с 1 до 6 %) приводит к увеличению напряженности электрического поля у их концов. Так, у волокон длиной 100 мкм максимальное увеличение напряженности достигает 32,4 %, 200 мкм – 84,46 %, 400 мкм – 111 %.

Так как электрическая прочность чистого трансформаторного масла находится в области 32 кВ/мм, то можно отметить, что максимальные значения напряженности, превышающие это значение, соответствуют волокнам длиной более 200 мкм. Значения максимальных напряженностей электрического поля при расположении мостика, состоящего из сухих или увлажненных волокон, между электродами системы представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов (табл. 3, рис. 6) показывает, что увеличение максимальных значений напряженности между сухими волокнами в мостике над средней напряженностью (16 кВ/мм) чистого масляного промежутка составляет 27,12 % для волокон длиной 100 мкм, 35,94 % – 200 мкм, 55,37 % – 400 мкм и 61,6 % – 500 мкм. Таким образом, сухие волокна длиной более 200 мкм слабо

влияют на искажение напряженности электрического поля.

Увеличение максимальных значений напряженности над средней между влажными волокнами составляет 64,62 % для волокон длиной 100 мкм, 114,06 % – 200 мкм, 230,12 % – 400 мкм и 256,1 % – 500 мкм.

Из расчетных данных видно, что скорость роста напряженности электрического поля между волокнами мостиков снижается для волокон длиной более 400 мкм.

Увлажнение волокон с 1 до 6 % дает увеличение напряженности электрического поля между волокнами в мостике из частиц длиной 100 мкм на 29,5 %, 200 мкм – 57,47 %, 400 мкм – 112,47 % и 500 мкм – 120,34 %.

Необходимо отметить, что напряженность поля в мостиках из сухих волокон (от 100 до 500 мкм) не превышает электрической прочности чистого трансформаторного масла в 32 кВ/мм. Для мостиков из влажных волокон напряженность поля начинает превышать электрическую прочность чистого масла при длине волокон более 200 мкм.

Таблица 3. Значения максимальной напряженности между волокнами мостика

Длина волокон мостика, мкм	500		400		200		100	
	Сухое	Влажное	Сухое	Влажное	Сухое	Влажное	Сухое	Влажное
E_{max} , кВ/мм	25,86	56,98	24,86	52,82	21,75	34,25	20,34	26,34

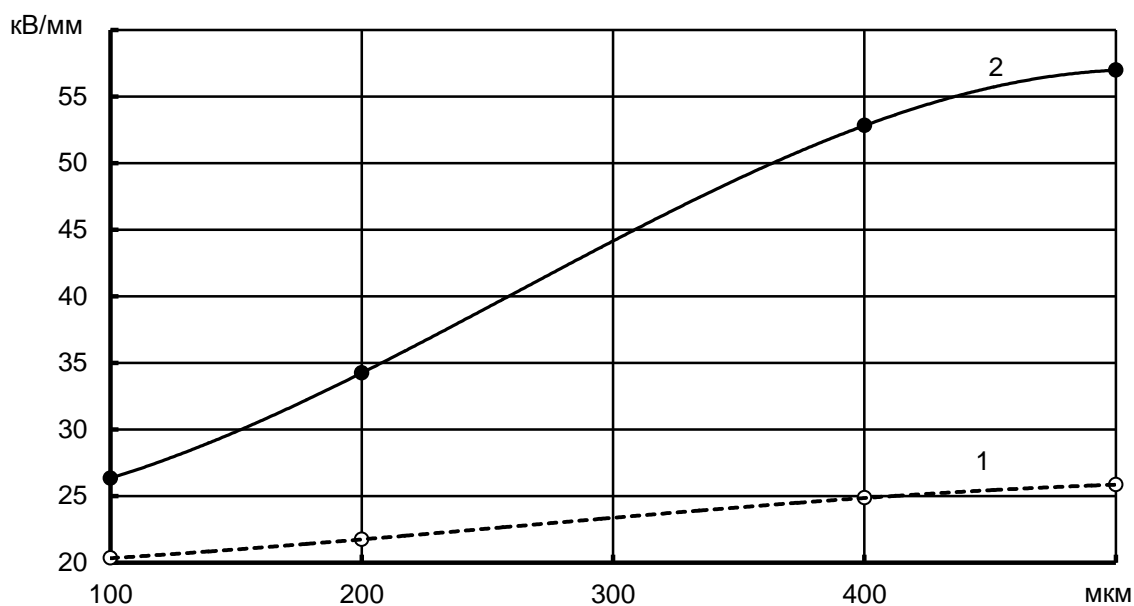


Рис. 6. Изменение максимальной напряженности между волокнами мостика от длины волокон: 1 – сухие волокна; 2 – влажные волокна

Увеличение напряженности поля между волокнами, особенно во влажном состоянии, выше электрической прочности чистого трансформаторного масла приводит к усилению ионизационных процессов в прослойках масла и снижению электрической прочности всего масляного промежутка.

Таким образом, наибольшее влияние на снижение электрической прочности масляных промежутков оказывают увлажненные волокна длиной более 200 мкм.

Распределение частиц по размерам в единице объема трансформаторного масла соответствует классам чистоты жидкости в соответствии с ГОСТ 17216-2001 [14]. По методике ГОСТ 6581-75 в испытательную ячейку заливают объем масла 0,4 л причем объем масла между электродами на два порядка меньше объема стандартной ячейки. Это следует учитывать при анализе эффективности испытаний масла на определение электрической прочности в стандартном разряднике.

В связи с этим далее определены изменения распределения частиц по размерам в объеме масла испытательной ячейки и в объеме масла между электродами стандартного разрядника.

Для этого проведен расчет числа частиц заданного размера в исследуемых объемах масла при испытании его в стандартном разряднике применительно к эксплуатационному маслу. Число частиц в объеме масла определялось по выражению

$$N = n_0 \cdot V_M, \quad (3)$$

где n_0 – число частиц заданного размера в единице объема (счетная концентрация); V_M – исследуемый объем масла.

Результаты расчета представлены в табл. 4. Анализ полученных данных показывает, что в объеме масла, находящемся в зазоре между электродами испытательной ячейки, нет частиц в виде волокон (400 мкм), хотя в самой ячейке находится достаточное количество волокон, соответственно, для классов чистоты эксплуатационного масла 9, 10, 11, 12 и 13.

Таким образом, применение существующей методики определения пробивного напряжения в стандартном разряднике приводит к тому, что влияние волокон (особенно увлажненных) на пробивное напряжение масла отражается не в полной мере. С другой стороны, как отмечалось выше, содержание волокон в объеме испытательной ячейки достаточно велико, поэтому необходимо при проведении испытаний создать условия для учета их влияния на формирование пробоя между электродами.

Выводы. Результаты моделирования показывают, что волокна целлюлозы приводят к сильному искажению электрического поля в межэлектродном промежутке и значительному увеличению напряженности поля в масляных прослойках между волокнами. Наиболее сильное влияние оказывают увлажненные волокна длиной более 200 мкм.

Таблица 4. Содержание механических частиц примесей в заданном объеме трансформаторного масла, шт.

Класс чистоты масла по ГОСТ 17216-2001	Объем масла	св. 100 до 200 мкм	Волокна (400 мкм)
13	1 м ³	2·10 ⁶	4·10 ⁵
	4·10 ⁻⁴ м ³	800	160
	2·10 ⁻⁶ м ³	4	нет
12	1 м ³	10 ⁶	2·10 ⁵
	4·10 ⁻⁴ м ³	400	80
	2·10 ⁻⁶ м ³	2	нет
11	1 м ³	5·10 ⁵	1·10 ⁵
	4·10 ⁻⁴ м ³	200	40
	2·10 ⁻⁶ м ³	1	нет
10	1 м ³	25·10 ⁴	5·10 ⁴
	4·10 ⁻⁴ м ³	100	20
	2·10 ⁻⁶ м ³	нет	нет
9	1 м ³	12·10 ⁴	4·10 ⁴
	4·10 ⁻⁴ м ³	48	16
	2·10 ⁻⁶ м ³	нет	нет

Результаты расчета распределения частиц показывают, что при проведении испытаний трансформаторного масла на пробой в стандартной ячейке слабо учитывается влияние длинных волокон (более 200 мкм) из-за малого объема масла между электродами. Это приводит к искажению результатов определения электрической прочности масла в действующем оборудовании.

Полученные результаты могут стать еще одним шагом на пути улучшения оценки качества трансформаторного масла, используемого в силовых трансформаторах в качестве изоляции.

Также полученные результаты могут быть использованы при исследованиях механизмов электрофизических процессов, происходящих в жидких диэлектриках при наличии волокон, так как такие исследования не проводились с середины прошлого века.

Список литературы

1. Лоханин А.К., Соколов В.В. Обеспечение работоспособности маслонеполненного оборудования после расчетного срока службы // Электро. – 2002. – № 1. – С. 10–16.
2. О повреждениях силовых трансформаторов напряжением 110–500 кВ в эксплуатации / Б.В. Ванин, Ю.Н. Львов, М.Ю. Львов и др. // Электрические станции. – 2001. – № 9. – С. 53–58.
3. Повреждаемость, оценка состояния и ремонт силовых трансформаторов / А.П. Долин,

В.К. Крайнов, В.В. Смекалов, В.Н. Шамко // Энергетик. – 2001. – № 7. – С. 30–34.

4. Техника высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров и др.; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург, 2003. – 608 с.

5. Мельникова О.С. Выбор и расчет статистических характеристик электрической прочности масляных каналов главной изоляции трансформаторов для повышения эффективности ее диагностики // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 3. – С. 38–44.

6. Методологические аспекты развития частичных разрядов и контроля изоляции силовых трансформаторов в эксплуатации / М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов, В.Б. Комаров и др. // Энергетик. – 2017. – № 9. – С. 16–20.

7. Сканин Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.

8. Черноготский В.М., Джунь Л.П. Методология выбора изоляции трансформаторного оборудования УВН переменного тока / Электро. – 2009. – № 4. – С. 19–25.

9. Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А. Инженерный метод расчета электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения // Электричество. – 2005. – № 3. – С. 82–85.

10. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1968. – 488 с.

References

1. Lokhanin, A.K., Sokolov, V.V. Obespechenie rabotosposobnosti maslonapolnennogo oborudovaniya posle raschetnogo sroka

sluzhby [Ensuring the operability of oil-filled equipment after the estimated service life]. *Elektro*, 2002, no. 1, pp. 10–16.

2. Vanin, B.V., L'vov, Yu.N., L'vov, M.Yu. O povrezhdeniyakh silovykh transformatorov napryazheniem 110–500 kV v ekspluatatsii [Damage of power transformers with voltage 110–500 kV during exploitation]. *Elektricheskie stantsii*, 2001, no. 9, pp. 53–58.

3. Dolin, A.P., Kraynov, V.K., Smekalov, V.V., Shamko, V.N. Povrezhdaemost', otsenka sostoyaniya i remont silovykh transformatorov [Damage, condition assessment and repair of power transformers]. *Energetik*, 2001, no. 7, pp. 30–34.

4. Bogatenkov, I.M., Bocharov, Y.N., Gumerova, N.I. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [Technique of high voltages]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat. Sankt-Peterburgskoe otdelenie, 2003. 608 p.

5. Mel'nikova, O.S. Vybor i raschet statisticheskikh kharakteristik elektricheskoy prochnosti maslyanykh kanalov glavnoy izolyatsii transformatorov dlya povysheniya effektivnosti ee diagnostiki [The selection and calculation of the statistical characteristics of the electric strength of the oil channels of the main insulation of transformers to increase the efficiency of its diagnosis]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 3, pp. 38–44.

6. L'vov, M.Yu., L'vov, Yu.N., Komarov, V.B., Kulyukhin, S.A., Mit'kin, Yu.A., Vdoviko, V.P. Metodologicheskie aspekty razvitiya chastichnykh razryadov i kontrolya izolyatsii silovykh transformatorov v ekspluatatsii [Methodological aspects of the development of partial discharges and insulation control of power transformers during operation]. *Energetik*, 2017, no. 9, pp. 16–20.

7. Skanavi, G.I. *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nykh poley)* [Physics of dielectrics (strong fields)]. Moscow: GIFML, 1958. 907 p.

8. Chornogotskiy, V.M., Dzhun', L.P. Metodologiya vybora izolyatsii transformatornogo oborudovaniya UVN peremennogo toka [Methodology for the selection of insulation of transformer equipment UVN AC]. *Elektro*, 2009, no. 4, pp. 19–25.

9. Lokhanin, A.K., Larin, V.S., Matveev, D.A. Inzhenernyy metod rascheta elektricheskoy prochnosti glavnoy izolyatsii silovykh transformatorov vysokogo napryazheniya [Engineering method for calculating the electrical strength of the main insulation of high voltage power transformers]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 3, pp. 82–85.

10. Govorkov, V.A. *Elektricheskie i magnitnye polya* [Electric and magnetic fields]. Moscow: Energiya, 1968. 488 p.