

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Сандомирский Андрей Всеволодович

КУРСОВАЯ РАБОТА

Измерение электрической прочности перфтордибутилового эфира

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18303

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Куперштох А.Л.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

д.ф.-м.н. Вячеславов Л. Н.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Целью работы являлось измерение эффективного напряжения пробоя на соосных сферических электродах, при котором между ними происходил пробой, а также определение характера функции вероятности пробоя. Электроды были помещены в жидкий диэлектрик – перфтордибутиловый эфир (ПФДБЭ). С помощью специального аппарата подавалось линейно нарастающее переменное напряжение. При некотором напряжении происходил пробой. Получены экспериментальные данные, по которым был построен график, и произведены статистические обработки результатов, подсчитаны среднее значение эффективного напряжения пробоя и стандартное отклонение. Были определены параметры функции плотности вероятности $f(E) = AE^n$, при которых результаты моделирования данного стохастического процесса с хорошей точностью совпали с экспериментальными данными.

Ключевые слова: сферические электроды, жидкий диэлектрик, электрический пробой, интеграл действия поля, распределение электрического поля, вероятность зарождения пробоя, схема Бернулли.

Оглавление

Введение.....	4
1. Стохастический процесс зарождения электрического пробоя диэлектриков	4
1.1. Распределение электрического поля	4
1.2. Механизм пробоя в жидких диэлектриках.....	5
2. Описание установки для измерения пробоев.....	6
3. Зарождение пробоя на сферических электродах	9
3.1. Электрическое поле на поверхности электродов	9
3.2. Вероятность зарождения пробоя на поверхности электродов.....	10
4. Измерение напряжений пробоя	12
5. Компьютерное моделирование	13
6. Заключение	19
7. Благодарности.....	20
Список использованной литературы.....	20
Приложение	22

Введение

В наше время проблема электрического пробоя в жидких диэлектриках очень актуальна, учитывая техногенные катастрофы и аварии, происходящие на важных для населения объектах. Могут происходить пробой жидкого диэлектрика внутри трансформаторов и конденсаторов на электрических подстанциях высокого напряжения, при этом происходит разгерметизация оборудования, выброс и воспламенение больших объёмов масла (до нескольких тонн).

Напряжение пробоя очень важно во многих физических областях, поскольку характеризует свойства данного диэлектрика и его поведение в конкретных условиях при данном физическом процессе. Для решения множества задач электростатики необходимо знать не только электрическое поле на поверхности диэлектрика, но и также распределение электрического поля во всём пространстве между электродами. Полученная в [1] аналитическая зависимость для сферических электродов позволяет рассчитать электрическое поле в любой точке на поверхности полусферических электродов, что позволило смоделировать стохастический процесс пробоя при разных условиях (изменение геометрии электродов). Это даёт возможность восстановить параметры функции плотности вероятности $f(E) = AE^n$, при которых результаты моделирования с хорошей точностью совпадают с экспериментальными данными.

1. Стохастический процесс зарождения электрического пробоя диэлектриков

1.1. Распределение электрического поля

При небольшом расстоянии между сферическими электродами только малая часть их площади вблизи оси симметрии вносит основной вклад в вероятность зарождения пробоя, где напряжённость электрического поля достаточно высока. Ранее в работе [1] было показано, что в течение

интервала времени t зарождения пробоя не произойдёт с вероятностью $P_-(t) = \exp(-H)$. Величина

$$H(t) = \int_0^t \left(\int_S f(E) ds \right) dt \quad (1)$$

имеет физический смысл безразмерного аналога статистического времени запаздывания и может быть названа интегралом действия поля. Целью работы является определение функции $f(E)$ по экспериментальным данным, полученным в серии пробоев исследуемого диэлектрика.

1.2. Механизм пробоя в жидких диэлектриках

Пробой жидких диэлектриков происходит при бóльших напряжениях, чем пробой газообразных диэлектриков: жидкие диэлектрики имеют более высокую электрическую прочность, которая объясняется значительно меньшей длиной свободного пробега электронов.

В отличие от газовых сред, в жидкостях между атомами или молекулами, расположенными достаточно близко друг к другу, возникает сильное взаимодействие. Поэтому поведение электронов в жидкости существенно отличается от их поведения в газовой фазе. В частности, они не могут свободно двигаться и ускоряться в электрическом поле.

К настоящему времени не существует общепринятой теории, позволяющей достаточно строго произвести расчет электрической прочности той или иной диэлектрической жидкости.

В последнее время всё большее признание получает модель, объясняющая пробой жидкостей процессами ионизации газовых включений на поверхности электродов. Не вдаваясь в подробности, можно отметить, что данная модель позволяет качественно объяснить процессы зарождения пробоя.

Электрический пробой тщательно очищенных жидкостей происходит за время $\sim 10^{-5} - 10^{-8}$ с. Электрическая прочность жидкостей достаточно велика и составляет величину порядка 10^7 В/м. На величину $E_{пр}$ влияют многие факторы: примеси, материал электродов, длительность воздействия напряжения, частота, температура, давление и др. [2].

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, может потерять свойства электроизоляционного материала, если напряженность поля достаточно высока. Это явление носит название пробоя диэлектрика или нарушения его электрической прочности. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется напряжением пробоя, а значение напряженности электрического поля, соответствующее этому напряжению, – электрической прочностью диэлектрика. Пробой диэлектрика приводит к потере диэлектрических свойств и образованию канала с высокой электрической проводимостью. Как правило, электрическая прочность измеряется в кВ/см [3]: $E_{пр} = U_{пр}/l$, где $U_{пр}$ – напряжение пробоя, а l – толщина диэлектрика в том месте, где произошёл пробой.

2. Описание установки для измерения пробоев

Аппарат АИМ-80 (Рис. 1) [4] предназначен для испытания изоляционного масла и других жидких диэлектриков на электрическую прочность. При этом подаётся линейно нарастающее напряжение переменного (синусоидального) тока, частотой 50 Гц, при температуре от +5 С до +40 С и относительной влажности до 80%. Конструкция аппарата выполнена в виде пульта переносного типа и включает в себя следующие основные элементы: бак с высоковольтным трансформатором (Рис. 2); регулятор напряжения (вариатор) с моторным приводом; измерительная ячейка с электродами [4].



Рис. 1. Прибор АИМ-80.

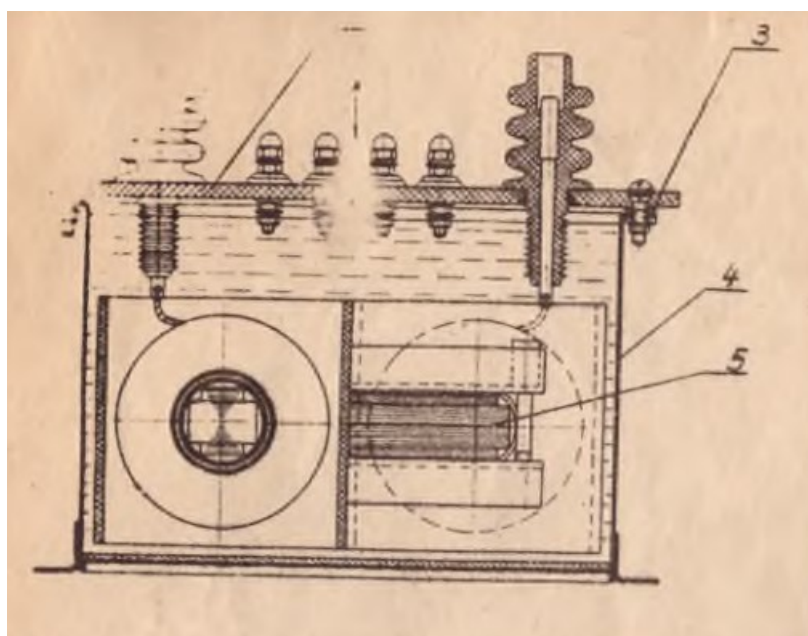


Рис. 2. Бак с высоковольтным трансформатором [4].

Скорость увеличения эффективного значения переменного напряжения линейно нарастающей амплитуды $k_e = 2 \text{ кВ/с}$. Максимально возможное эффективное напряжение составляет 80 кВ.

В данной работе исследовались пробой в специально изготовленной измерительной ячейке (Рис. 3), в которую заливался исследуемый жидкий

диэлектрик. Два одинаковых полусферических электрода из нержавеющей стали (Рис. 4) располагались напротив друг друга. Поверхность электродов предварительно шлифовалась тряпочкой с алмазной пастой, а затем протиралась спиртом, чтобы убрать дефекты поверхности. В качестве жидкого диэлектрика использовался перфтордибутиловый эфир. Дегазация не производилась. Для уменьшения расхода этой сравнительно дорогой жидкости в свободное пространство помещались три тефлоновые пластины (на дно и с боков).



Рис. 3. Измерительная ячейка с полусферическими электродами.



Рис. 4. Фотография полированного полусферического электрода после 60 пробоев в ПФДБЭ. Диаметр электрода 34.2 мм.

3. Зарождение пробоя на сферических электродах

3.1. Электрическое поле на поверхности электродов

Для многих конкретных задач в случае малых зазоров распределение электрического поля по поверхности достаточно правильно учесть только в ограниченной области вблизи оси симметрии, где напряженность электрического поля высока.

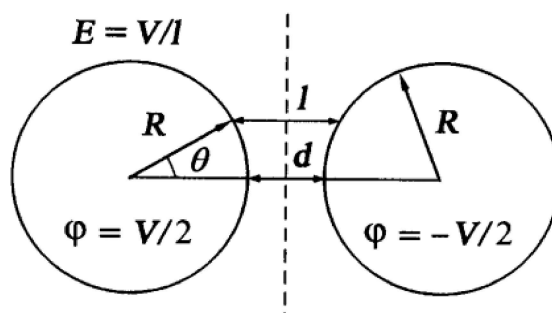


Рис. 5. Две металлические сферы с зазором d между ними [1].

Для малых зазоров между сферическими электродами приближённо можно считать, что для квазиоднородного электрического поля справедлива

формула $E = V/l$ [1,5]. Тогда

$$E = \frac{\alpha(\beta) \langle E_0 \rangle}{1 + \frac{1 - \cos \theta}{\beta}}, \quad (2)$$

с учётом коэффициента усиления электрического поля $\alpha(\beta) = 1 + 2/3\beta$ на полюсе электрода (при $\theta = 0$) по сравнению со значением, усреднённым вдоль оси $\langle E_0 \rangle = V/d$ (Рис. 5). Здесь $\beta = d/(2R_c)$, R_c – радиус кривизны, d – зазор между электродами.

3.2. Вероятность зарождения пробоя на поверхности электродов

При некоторых предположениях (при малости вероятности) можно считать, что вероятность зарождения пробоя за короткий интервал времени dt на маленьком элементе площади электрода ds определяется некоторой функцией, резко зависящей от поля вблизи поверхности E . Конкретный вид функции $f(E)$ тесно связан с физической природой микроскопических процессов, происходящих на поверхности электродов, и зависит от свойств конкретного диэлектрика. Таким образом, при малых вероятностях получаем

$$dp(E) = f(E) dt ds. \quad (3)$$

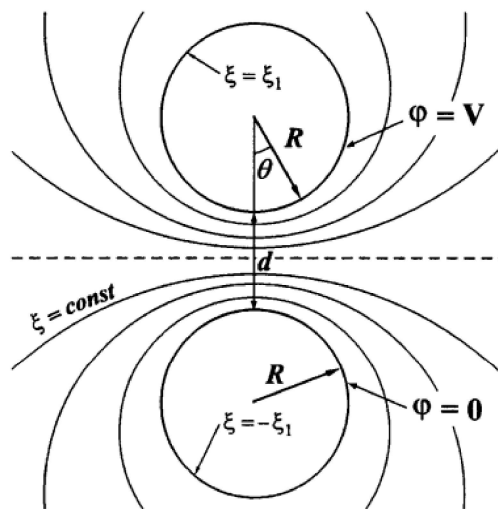


Рис. 6. Конфигурация сферических электродов и поверхностей равного потенциала электрического поля $\xi = \text{const}$ [1].

Функция вероятности $f(E)$ должна резко зависеть от электрического поля, чтобы описать почти пороговый характер электрического пробоя жидких диэлектриков. Для этого была выбрана степенная функция $f(E) = AE^n$, где A – числовой коэффициент, n – показатель степени.

В этой работе использовалась величина вероятности зарождения пробоя, для которой определяющий параметр — значение интеграла по поверхности электрода:

$$J = \int_S f(E) ds \quad (5)$$

где функция $f(E)$ – плотность вероятности зарождения пробоя за короткий интервал времени на маленьком элементе площади электрода, величина электрического поля вблизи которого равна E .

В случае постоянного напряжения при интегрировании функции $f(E)$ по поверхности полусферических электродов S получаем вероятность зарождения пробоя в единицу времени

$$\int_S f(E) ds = \pi d R_c E_0 \int_{E_1}^{E_0} \frac{f(E)}{E^2} dE. \quad (6)$$

Здесь можно перейти от интегрирования по поверхности S к интегрированию по локальному значению электрического поля. Для этого была использована формула (2). Здесь $E_0 = \alpha(\beta) \langle E_0 \rangle$ – максимальное значение электрического поля на полюсе электрода при $\theta = 0$, E_1 – минимальное значение электрического поля.

Так как вероятность пробоя резко зависит от электрического поля (на краях сферического сегмента электрода пробой почти невероятен), то при малых зазорах d нижний предел интегрирования можно положить равным нулю.

Аналогично для переменного напряжения линейно нарастающей амплитуды [6]

$$H(t) = \frac{R_c d^2 A E_0^{n+1}}{\sqrt{2} k_e (n^2 - 1)} \int_0^{\pi} \sin^n(z) dz. \quad (7)$$

4. Измерение напряжений пробоя

Было проведено 60 измерений (Приложение) эффективного напряжения пробоя в перфтордибутиловом эфире (ПФДБЭ). Химическая формула имеет вид $\text{CF}_3-(\text{CF}_2)_3-\text{O}-(\text{CF}_2)_3-\text{CF}_3$. ПФДБЭ является перспективным жидким диэлектриком и представляет собой прозрачную бесцветную жидкость, плотностью $\rho = 1.7 \text{ г/см}^3$ и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 1.82$. Достоинством ПФДБЭ являются его свойства, такие как негорючесть и абсолютная нетоксичность. Радиус кривизны электродов из нержавеющей стали R_c составлял 30 мм. Зазор между электродами $d = 2.5$ мм. После каждого измерения выдерживалась пауза примерно в 20 секунд для удаления пузырьков, которые образуются после предыдущих пробоев и снижают электрическую прочность промежутка. Кроме того маленькая вязкость ПФДБЭ способствует всплыванию пузырьков. Затем снова подавалось напряжение.

Полученные данные по напряжениям пробоя приведены в таблице 1 и на Рис. 7. Разброс данных подтверждает стохастический характер самого процесса пробоя.

Несколько первых значений демонстрируют так называемый «эффект тренировки электродов» [7]. То есть точки лежат несколько ниже среднего значения. Принято считать, что это связано с первоначальным наличием на электроде т.н. слабых мест (пылинки, пузырьки и т.п.).

Среднее значение напряжения получилось равным 41.8 кВ. Среднеквадратичное отклонение составило 6.64 кВ. Типичные стандартные

отклонения от средних значений для некоторых жидкостей (mineral oil, natural ester, synthetic ester) составляют порядка 5 кВ [7].

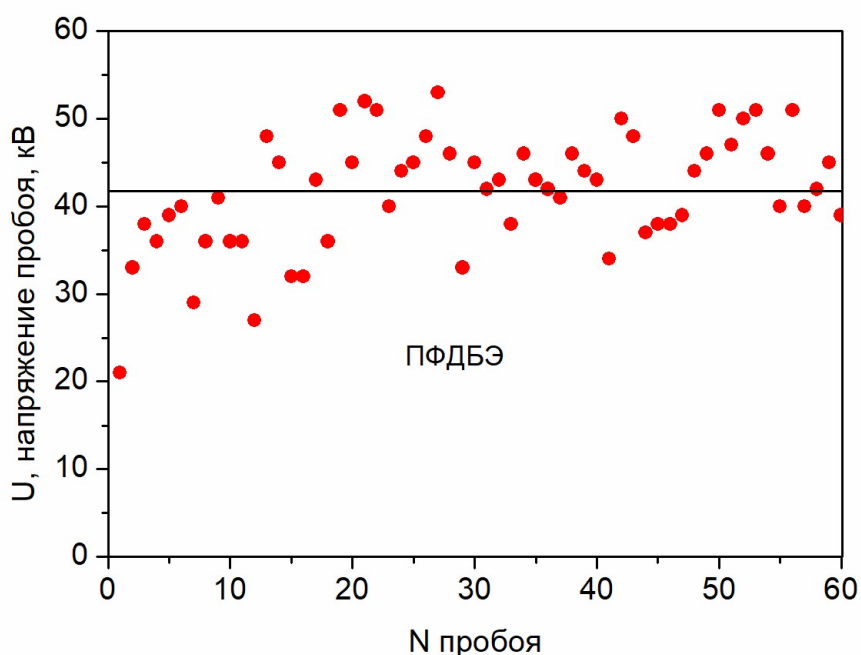


Рис. 7. Измеренные напряжения пробоя для ПФДБЭ. N = 60.

$$\langle U_{\text{эфф}} \rangle = 41.8 \text{ кВ}. \sigma = 6.6 \text{ кВ}.$$

5. Компьютерное моделирование

Для моделирования процесса стохастического пробоя в жидком диэлектрике в данной работе была написана программа на языке C++. Использовалась интерактивная графическая оболочка MPPG (Modeling Physical Phenomena Graphical User Interface) – библиотека, разработанная Прууэлом Э. Р. для создания пользовательского интерфейса при численном моделировании физических процессов [8]. Она включает в себя окошки с графиками, редактируемые поля ввода/вывода (Рис. 9).

Рассматривалась плоскость XY перпендикулярная оси электрода радиусом кривизны R_c . Поверхность сегмента электрода радиуса R_s проектировалась на эту плоскость. Эта проекция разбивалась на большое количество (100×100) маленьких квадратных элементов площадью $dx \cdot dy$.

Для каждого элемента находилось расстояние $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ от начала координат плоскости XY (Рис. 8), и вычислялось локальное электрическое поле вблизи него по формуле (2).

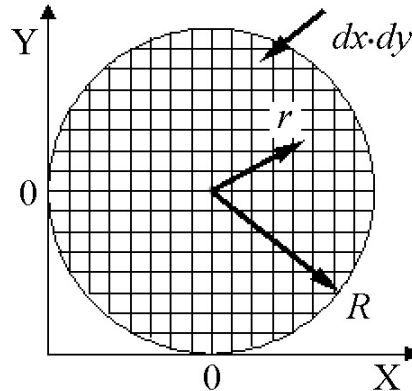


Рис. 8. Схема разбиения плоскости XY на элементы $dx*dy$.

Дальше запускался процесс последовательного перебора этих элементов, и согласно вероятности $dp(E) = f(E)dt ds$, зависящей от электрического поля, на каждом элементе пробой либо возникал за шаг по времени dt , либо нет. Здесь $ds = dxdy / \cos \theta$ – элемент площади сферической поверхности электрода. Для этого использовались псевдослучайные числа ksi , равномерно распределенные от 0 до 1. Такой стохастический процесс перебора элементов на каждом шаге по времени dt называется схемой Бернулли.

В программе переменное напряжение $U = U_a \sin(2\pi ft)$ частотой $f = 50$ Гц линейно нарастало по амплитуде $U_a = k_e \sqrt{2t}$. Здесь напряжение измеряется в киловольтах, а время в секундах. После очередного пробоя время обнулялось. Шаг по времени был выбран 0.5 мс. Значения координат и напряжения каждого пробоя запоминались в массивах.

Фрагмент кода программы:

<pre>void ff(){ srand48((long)time(0)); while (may_i_repeat()){ t+=dt; beta = d/(2.0*Rc); alpha = 1.0 + 2.0/3.0*beta; Ua = 0.002*sqrt(2.0)*t; U = Ua * sin(0.1*Pi*t); Emax = alpha*U/d; for (int i=1; i<=nx; i++){ for (int j=1; j<=ny; j++){ x = dx * (i - nx/2.0); y = dx * (j - ny/2.0); r2 = x*x+y*y;</pre>	<pre>if (r2 < Rs*Rs){ cost = sqrt(Rc*Rc-r2)/Rc; E = Emax/(1.0 + (1.0-cost)/beta); f = A*exp(n*log(E)); p = f*dt*dx*dy/cost; ksi = drand48(); if(ksi < p){ if(kb <= nb){ kb = kb + 1; xb[kb] = x; yb[kb] = y; Ub[kb] = U; t = 0; } // end if } // end if } // end for for } // end while } // end ff</pre>
--	---

Моделировалась последовательность из 100 пробоев. По этим данным строилась картина распределения мест зарождения пробоев на поверхности полусферических электродов (Рис. 9) и график полученных напряжений пробоев (Рис. 10). Значение текущих параметров (радиус кривизны электродов и зазор между ними), а также полученные среднее значение напряжения пробоя и стандартное отклонение выводились в таблицу (Рис. 9 и 10). Были определены параметры функции $f(E) = AE^n$ как $n = 6$ и $A = 1.6 \cdot 10^{-12}$, при которых среднее значение составило 42 кВ, а стандартное отклонение – 5.7 кВ, что совпадает с полученными экспериментальными данными (Рис. 11).

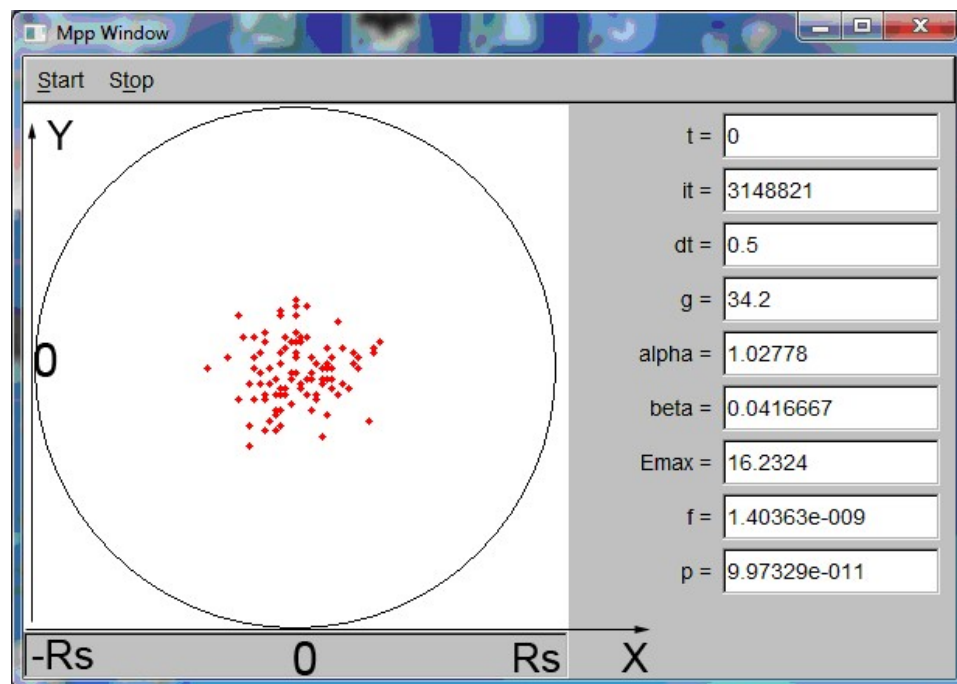


Рис. 9. Смоделированное распределение мест зарождения пробоев на поверхности полусферических электродов. $N = 100$.

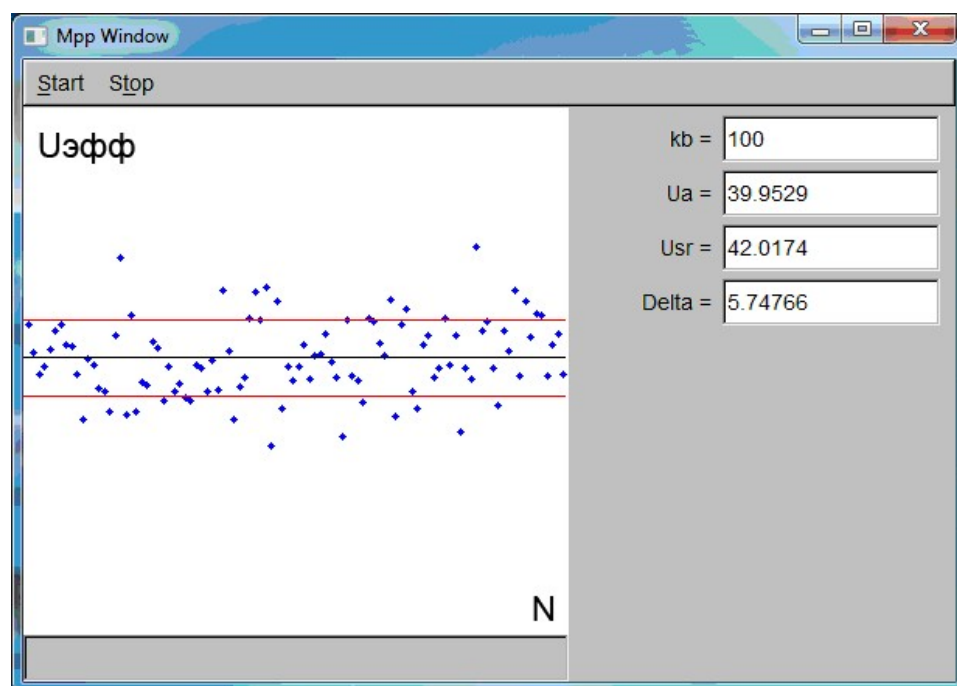


Рис. 10. График полученных напряжений пробоев. $N = 100$.

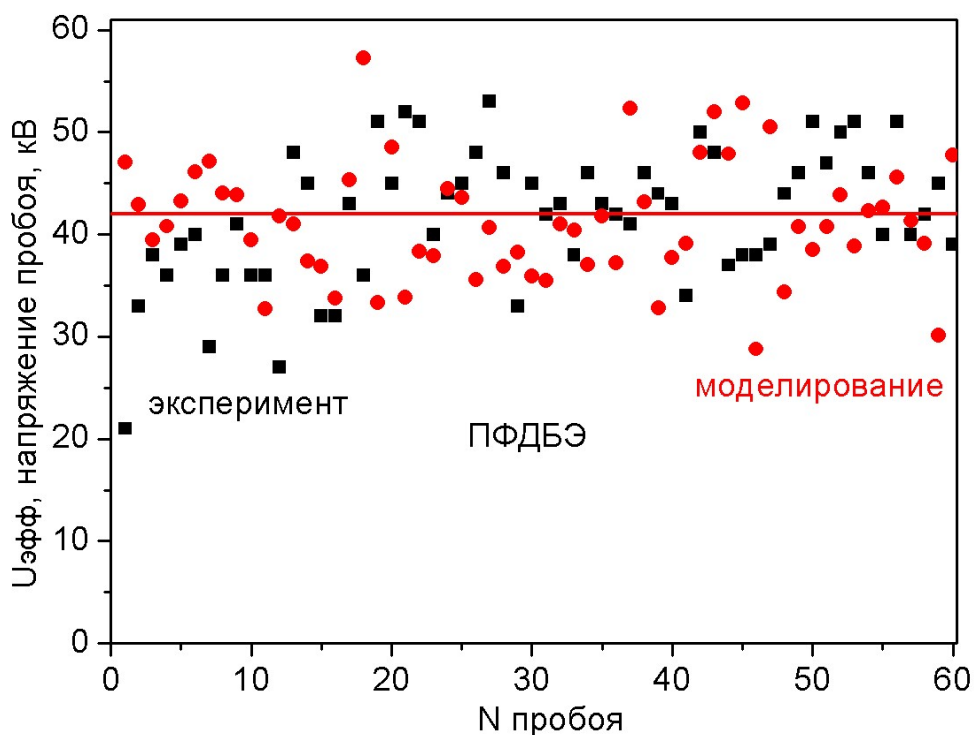


Рис. 11. Сравнение экспериментальных и смоделированных значений напряжения пробоя. $\langle U_{эфф} \rangle = 42$ кВ.

После восстановления параметров n и A функции $f(E)$ по экспериментальным данным имеется возможность моделировать возникновение пробоев при изменении радиуса кривизны электродов и зазора между ними.

Видно, что при уменьшении зазора между электродами область локализации поля уменьшается (Рис. 12). При увеличении радиуса кривизны электродов область распределения мест пробоев расширяется (Рис. 13).

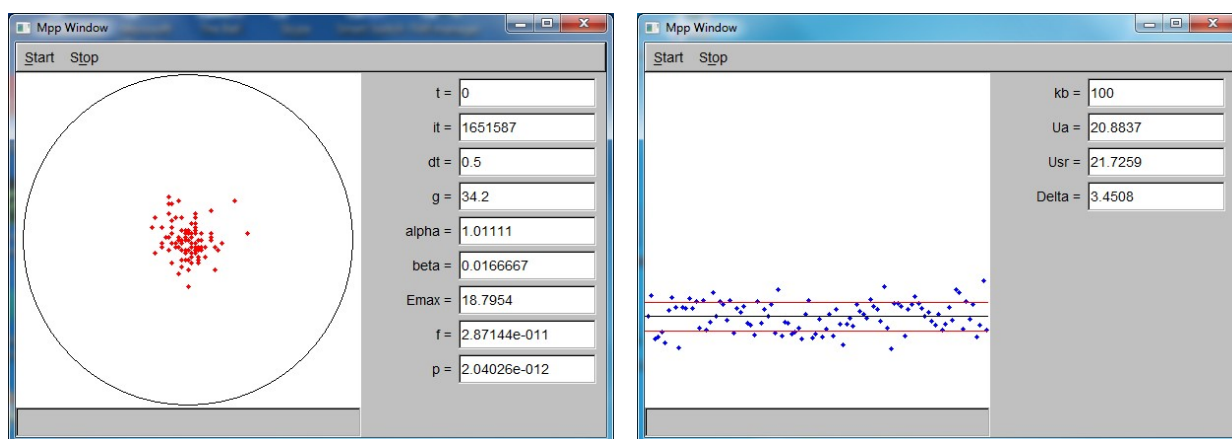


Рис. 12. Радиус кривизны электродов – 30 мм, зазор – 1 мм.

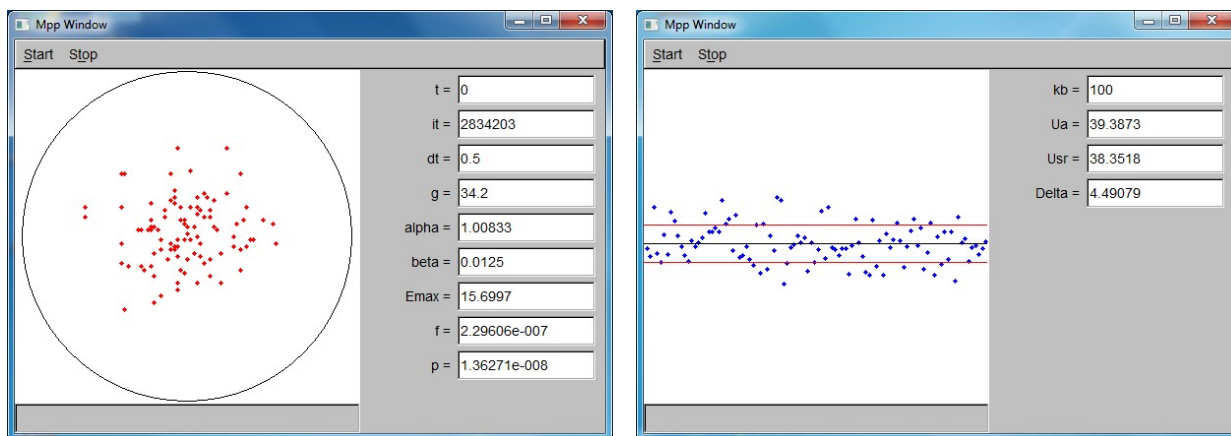


Рис. 13. Радиус кривизны – 100 мм, зазор – 2.5 мм.

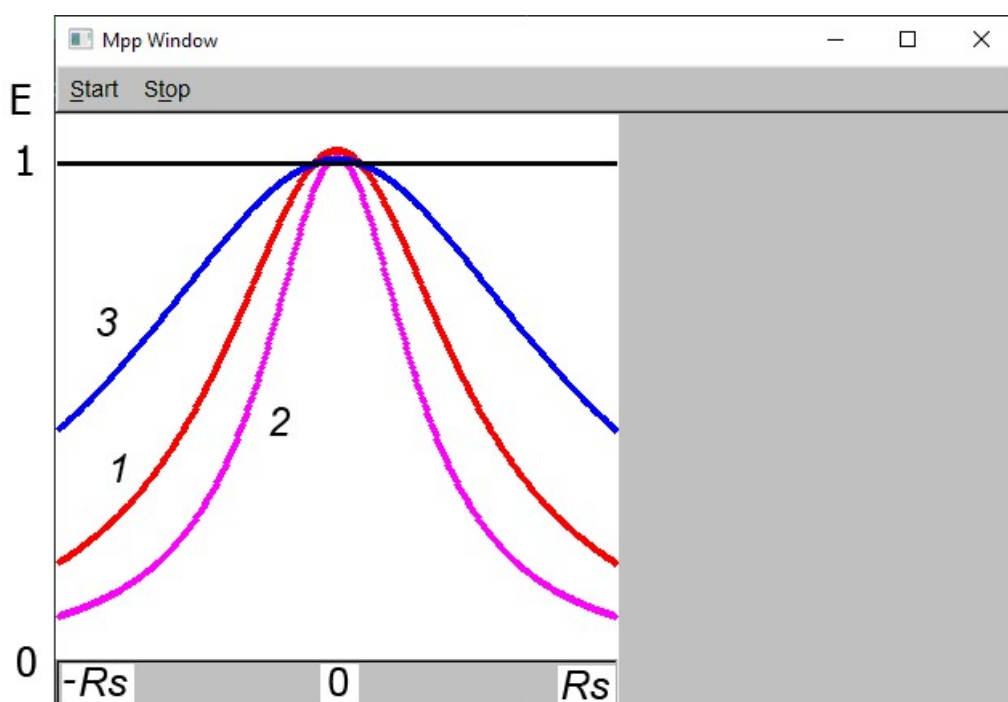


Рис. 14. Распределение электрического поля по поверхности электрода в безразмерных единицах ($U/d = 1$). Кривая 1 – $d = 2.5$ мм, $R_c = 30$ мм; кривая 2 – $d = 1$ мм, $R_c = 30$ мм; кривая 3 – $d = 2.5$ мм, $R_c = 100$ мм.

Эффективная площадь электрода – область, где значения поля достаточно большие, зависит от зазора между электродами и радиуса кривизны электрода. На Рис. 14 и 15 показаны распределения электрического поля согласно формуле (2). При увеличении радиуса кривизны или зазора между электродами эффективная площадь увеличивается (Рис. 14, 15).

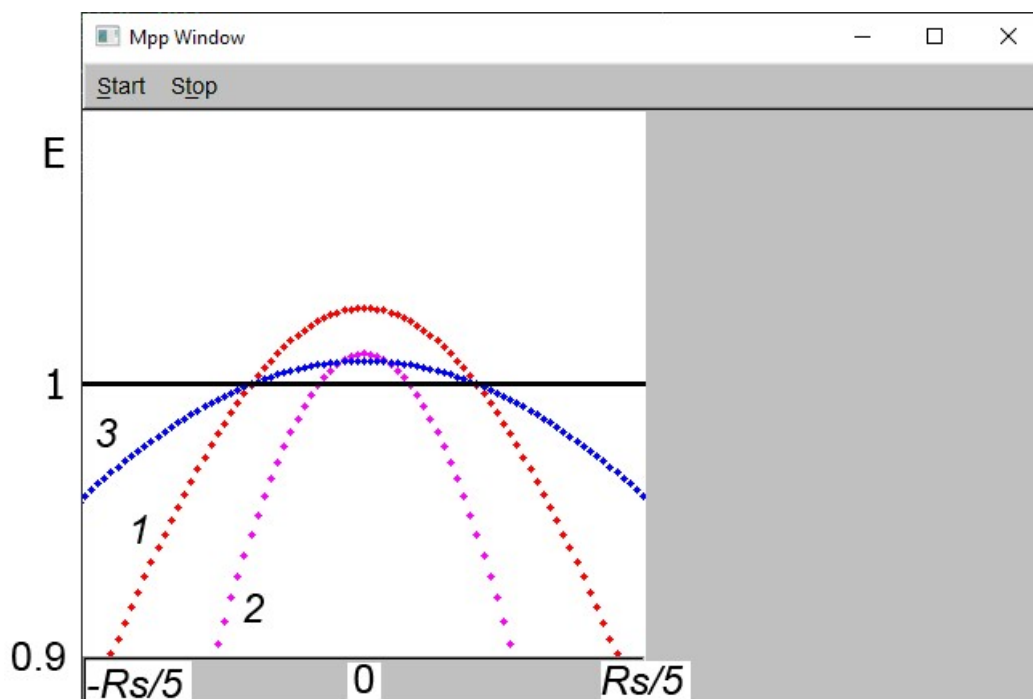


Рис. 15. Распределение электрического поля по поверхности в окрестности полюса электрода в увеличенном масштабе. Кривая 1 – $d = 2.5$ мм, $R_c = 30$ мм; кривая 2 – $d = 1$ мм, $R_c = 30$ мм; кривая 3 – $d = 2.5$ мм, $R_c = 100$ мм.

6. Заключение

Были проведены эксперименты по измерению электрической прочности перфтордибутилового эфира. Среднее значение эффективного напряжения получилось равным 41.8 кВ. Среднеквадратичное отклонение составило 6.64 кВ. Типичные стандартные отклонения от средних значений для некоторых жидкостей (mineral oil, natural ester, synthetic ester) составляют порядка 5 кВ [7]. Были определены путём подбора параметры функции $f(E) = AE^n$, при которых результаты моделирования (среднее значение напряжения пробоя и стандартное отклонение) хорошо совпадают с полученными экспериментальными данными. В нашем случае параметры были определены как $n = 6$ и $A = 1.6 \cdot 10^{-12}$. При этих параметрах среднее значение эффективного напряжения в серии модельных расчётов составило 42 кВ, а стандартное отклонение – 5.7 кВ.

Среднее значение электрической прочности для малых зазоров получилось равным 167 кВ/см (радиус кривизны – 30 мм, зазор – 2.5 мм). При том же радиусе кривизны и уменьшении зазора до 1 мм средняя электрическая прочность возрастает до 217 кВ/см. При зазоре 2.5 мм и увеличении радиуса кривизны до 100 мм средняя электрическая прочность уменьшается до 153 кВ/см. Эти результаты объясняются формулой (7) для интеграла действия поля $H(t)$, который зависит от радиуса кривизны электродов и от зазора между ними. Кроме того, при увеличении скорости нарастания поля (напряжения) согласно формуле (7) электрическая прочность увеличивается. Продемонстрировано, что есть только понятие "динамической" прочности жидкого диэлектрика, которая зависит от конкретной геометрии и формы подаваемого напряжения. Таким образом, удалось построить численную модель такого сильно стохастического процесса, как пробой жидких диэлектриков.

7. Благодарности

Выражаю благодарность ведущему научному сотруднику Карпову Д. И. за проектирование и изготовление измерительной ячейки и электродов.

Список использованной литературы

1. Куперштох А.Л. Приближенные методы расчета распределения электрического поля по поверхности электродов сферической формы // Вестник КрасГУ: Серия "Физико-математические науки". 2005. № 4. С. 126–138.
2. Томилин В. И., Томилина Н. И., Бахтина В.А. Физическое материаловедение, Ч. 1, Пассивные диэлектрики, учебное пособие // СФУ, Красноярск. 2012. – 280 с.
3. Агеева Н. Д., Винаковская Н. Г., Лифанов В. Н. Электротехническое материаловедение, учебное пособие // ДВГТУ, Владивосток, 2006. – 115 с.
4. Аппарат АИМ-80. Паспорт и инструкция по эксплуатации, 1970. – 15 с.

5. Куперштох А.Л., Моделирование электрического пробоя жидких диэлектриков и гидродинамических течений, возникающих на предпробойной стадии: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05. – Новосибирск, 2007. – 326 с.
6. Kuperstokh A.L., Palchikov E.I., Karpov D.I., Vitellas I., Agoris D.P., Charalambakos V.P. Stochastic model of breakdown initiation in dielectric liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. P. 3106–3121.
7. Martin D., Tuah N., Wang Z. D. Statistical Analysis of the ac Breakdown Voltages of Ester Based Transformer Oils // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2008. V. 15. P. 1044–1050.
8. Прууэл Э. Р. MPPG (Modeling Physical Phenomena Graphical User Interface), URL: <http://ancient.hydro.nsc.ru/mppg/index.htm> .

Приложение

Таблица 1. Измеренные напряжения пробы для ПФДБЭ.

N	Ua, кВ	N	Ua, кВ	N	Ua, кВ
1	21	21	52	41	34
2	33	22	51	42	50
3	38	23	40	43	48
4	36	24	44	44	37
5	39	25	45	45	38
6	40	26	48	46	38
7	29	27	53	47	39
8	36	28	46	48	44
9	41	29	33	49	46
10	36	30	45	50	51
11	36	31	42	51	47
12	27	32	43	52	50
13	48	33	38	53	51
14	45	34	46	54	46
15	32	35	43	55	40
16	32	36	42	56	51
17	43	37	41	57	40
18	36	38	46	58	42
19	51	39	44	59	45
20	45	40	43	60	39