

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Прокопенко Яков Геннадьевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**“Влияние углеродных нанотрубок на инициирование электрического разряда в
газовых пузырях”**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18312

Научный руководитель:

в.н.с.,к.ф.-м.н. Карпов Д.И.

Оценка научного руководителя

« » _____ 20 г.

Преподаватель практикума

к.ф.-м.н. Симонов А.А.

Оценка преподавателя практикума

« » _____ 20 г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

« » _____ 20 г.

Новосибирск, 2019

Аннотация

Изучение физики возникновения пробоя в жидких диэлектриках имеет огромное значение в предотвращении множества аварий современного силового энергетического оборудования. В данной работе было измерено напряжения пробоя масла на электродах, так же было измерено напряжение пробоя масла с добавлением нанотрубок.

Для изучения влияние нанотрубок на напряжения пробоя в масле.

Оглавление

1. Введение.....	4
2. Теоретическая часть.....	5
2.1 Закон Пашена для разряда газов	5
3. Экспериментальная часть.....	6
3.1 Описание установки.....	7
3.2 Приготовление смеси углеродных нанотрубок с трансформаторным маслом.....	11
3.3 Измерение напряжения пробоя трансформаторного масла с добавлением нанотрубок.....	13
4. Заключение.....	17
5. Список использованной литературы.....	18

1. Введение

Целью работы является выявление возможности создания центров инжекции электронов в диэлектрической жидкости посредством добавления в нее углеродных нанотрубок. В случае успешного результата ставится задача определить максимальную концентрацию нанотрубок, при которой отсутствует пробой жидкости, но происходит пробой в газовом пузырьке, и измерить минимальное напряжение пробоя пузырька.

Физика пробоя жидких диэлектриков и распределение пробоя на поверхности электродов имеет огромное практическое и теоретическое применение. Жидкие диэлектрики используются в повседневной жизни в современном энергетическом оборудовании, в нашем случае трансформаторное масло используется в различных трансформаторах на электростанциях. Понимание механизмов зарождения пробоя и знание значения напряжения, которое может выдержать диэлектрик, может помочь избежать аварий в энергосистемах. Такие аварии высоковольтного оборудования могут иметь катастрофические последствия. Например, убытки от известной аварии на электростанции № 510 “Чагино” (Москва) в 2005 году оцениваются более, чем в два миллиарда рублей.

Одним из важнейших факторов развития аварийной ситуации в высоковольтном оборудовании является наличие в жидком диэлектрике пузырьков газа. Электрическая прочность газа существенно меньше прочности жидкого диэлектрика, а напряженность электрического поля в пузырьке выше, чем в жидкости. В частности, для пузырька сферической формы справедлива формула

$$E_i = \frac{\varepsilon_e}{2\varepsilon_e + \varepsilon_i} E_e,$$

где E_i – напряженность поля внутри, E_e напряженность поля снаружи, $\varepsilon_i = 1$ – коэффициент диэлектрической проницаемости внутри газового пузырька, ε_e – диэлектрическая проницаемость снаружи газового пузырька [1]. В результате, в пузырьке легко возникают частичные разряды (ЧР) которые, приводят к “старению” электрической изоляции и потере ее своих изолирующих свойств.

В настоящей работе исследовалась возможность возникновения ЧР в гелиевых пузырьках в трансформаторном масле. Ранее было показано [2,3], что во всплывающих пузырьках нарушается закон Пашена. А именно, измеренное в работе [2] напряжение ЧР в пузырьке оказалось в 2 – 2,5 раза выше значения следующего из закона Пашена. Используемая авторами работы [2] установка была хорошо изолирована от источников радиации. Авторы работ [2,3] высказали предположение, что причиной такого высокого напряжения ЧР является отсутствие в пузырьке иницирующих ЧР электронов. В настоящей работе в трансформаторное масло были добавлены углеродные нанотрубки. Предполагается проверить гипотезу о том, что в сильном электрическом поле нанотрубки, с концов которых возможна инжекция свободных электронов, могут послужить источником электронов, иницирующих разряд в газовом пузырьке.

2. Теоретическая часть

Зарождение пробоя в жидких диэлектриках. Процессы, предшествующие пробую в жидких диэлектриках имеют стохастическую природу. Многочисленные экспериментальные данные указывают на то, что ведущую роль в процессе зарождения пробоя занимают случайные процессы. Таким образом, описание стохастических закономерностей пробоя диэлектрика должно включать функции распределения вероятностей для таких процессов. Одним из таких случайных процессов является иницирование электронных лавин в газе, которое происходит в результате случайного события – появление первичного иницирующего электрона. Как правило, иницирующие электроны появляются в результате ионизации атомов (молекул) газа космическими лучами или радиоактивным излучением атомов в пределах Земли. Если электрическое поле в газе достаточно велико для того, чтобы электрон приобрел на длине свободного пробега энергию, достаточную для ионизации атомов газа, то в газе развивается электронная лавина. Развитие электронных лавин может привести к развитию стримера и / или электрическому пробую газового промежутка.

2.1 Закон Пашена для разряда газам

Закон Пашена, назван в честь Фридриха Пашена, сформулировавшего этот закон в 1889 году.

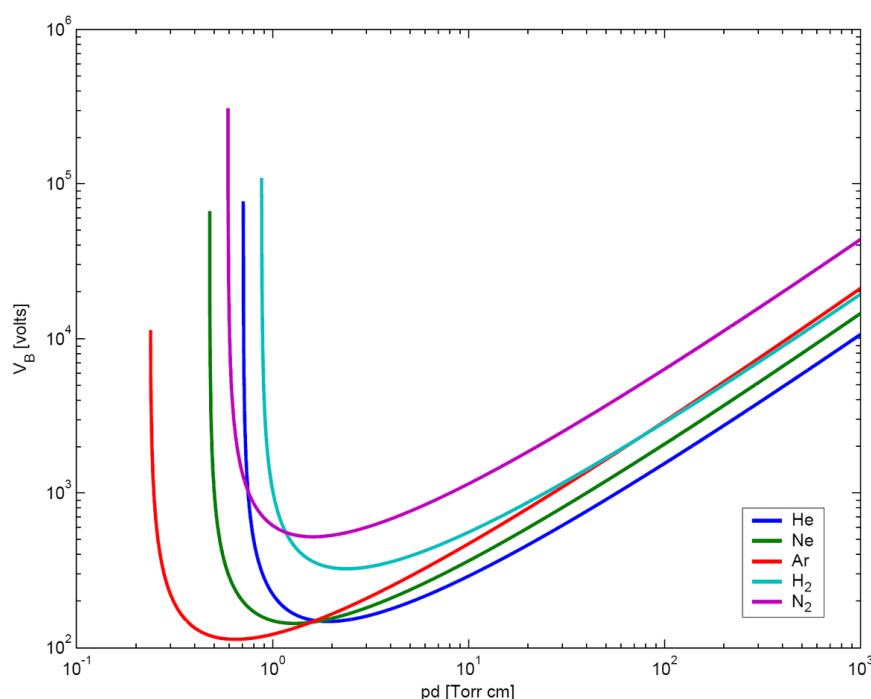


Рис. 1. Кривые Пашена для разных газов.

Пашен показал, что напряжение электрического пробоя газового промежутка U зависит только от произведения давления p и расстояния между электродами L – pL , а не отдельно от p и L [1]. В соответствии с законом Пашена, наименьшее напряжение зажигания газового разряда между двумя плоскими электродами (в однородном электрическом поле) есть величина постоянная (и характерная для данного газа) при одинаковых значениях pL . Закон Пашена означает, что кривые зажигания $U(p)$, измеренные для различных расстояний между электродами L , должны наложиться друг на друга, если их построить как функцию $U(pL)$. При выполнении закона Пашена напряжение в минимуме кривой зажигания, а также произведение pL должны сохраняться неизменными, постоянными.

Закон Пашена представляет собой частный случай закона подобия газовых разрядов: явления в разряде протекают одинаково, если произведение давления газа на длину разрядного промежутка остаётся величиной постоянной, а форма промежутка сохраняется геометрически подобной исходной.

3. Экспериментальная часть

В практической части данной работы проводится эксперимент по измерению минимального напряжения, при котором будут осуществимы частичные разряды в гелиевых пузырьках всплывающих в

трансформаторном масле, в которое добавлены нанотрубки как потенциальный источник свободных электронов.

3.1 Описание установки.

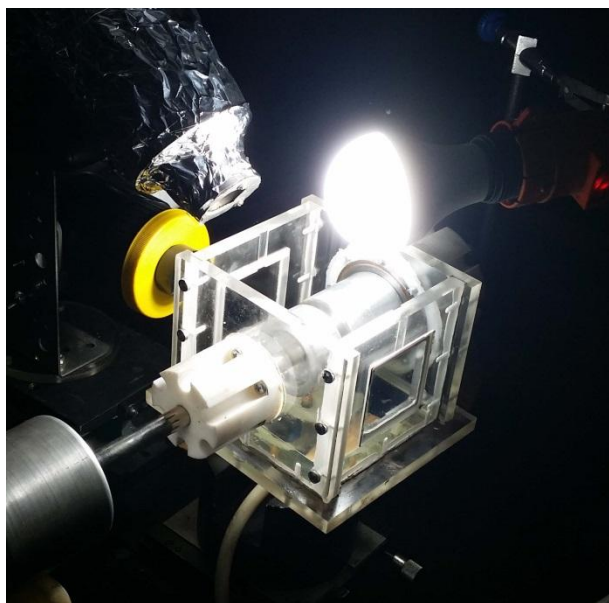


Рис. 2. Фотография установки (вид сверху).

В экспериментах использовалась готовая установка (рис. 2, 3) для исследования частичных разрядов (ЧР) во всплывающих жидком диэлектрике газовых пузырьках при воздействии высокого напряжения. Конструкция установки включает в себя следующие основные элементы: ячейка с диэлектрической жидкостью (рис.4), в которой смонтированы плоские электроды (радиус электродов 25 мм), высоковольтный блок, система подачи пузырьков гелия, схема оптической регистрации процесса. [3]

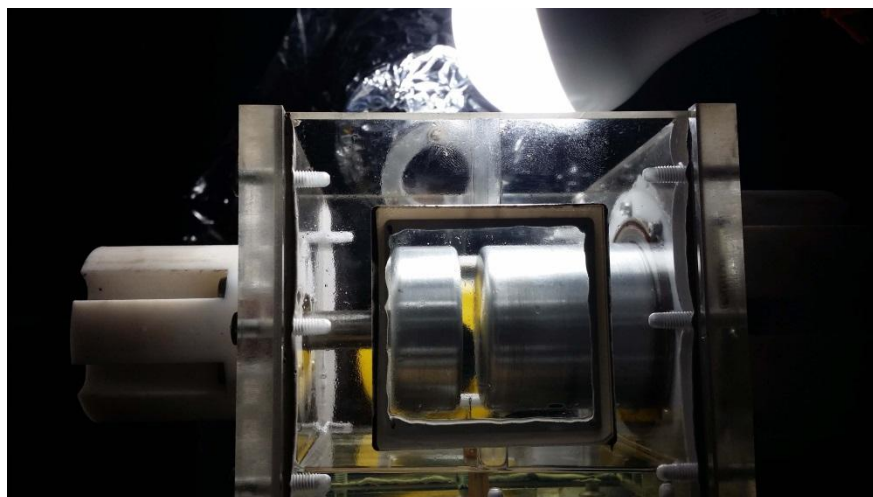


Рис. 3. Фотография установки (вид сбоку).

Ячейка в форме куба была выполнена из оргстекла толщиной стенок 10 мм. Внутренний объем ячейки равен 850 мл. В стенках ячейки есть два оптических окна для регистрации процесса. Плоские электроды размещались вертикально параллельно друг другу на расстоянии 10 мм друг от друга. Снизу через иглу в промежуток подавался гелий, что приводило к образованию пузырьков газа, всплывающих в диэлектрике в пространстве между электродами на одинаковом расстоянии от них. Пузырьки имели примерно одинаковый размер 2 мм, появлялись с интервалом 0,2 с и всплывали со средней скоростью 13,8 см/с.

Электрическая схема установки показана на рисунке 2. Напряжение на ячейке устанавливалось вручную путем регулирования входного напряжения на лабораторном трансформаторе в диапазоне от 11 В до 17 В.

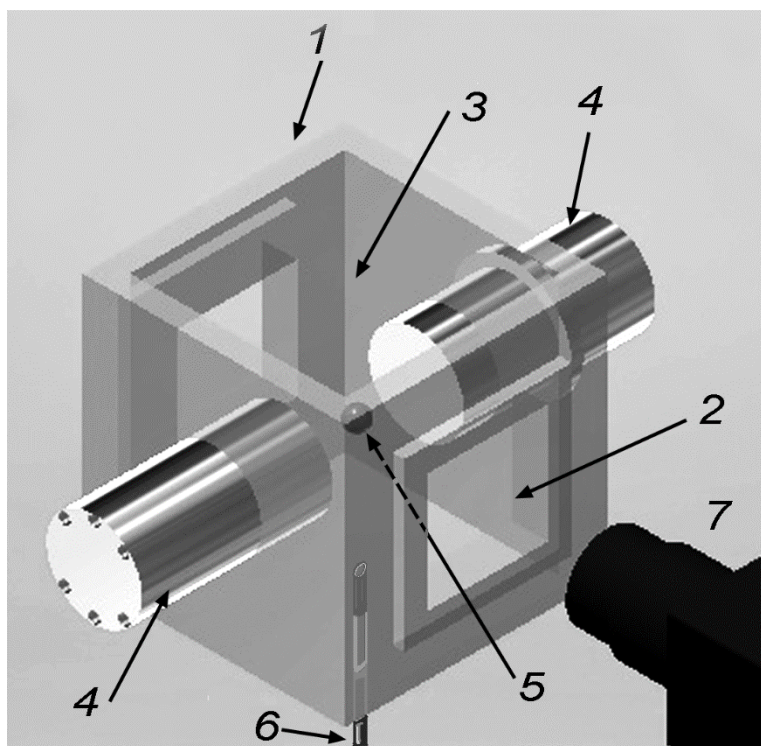


Рис. 4. Ячейка для регистрации ЧР во всплывающих пузырьках. 1 – ячейка из оргстекла, 2 – оптическое окно, 3 – трансформаторное масло, 4 – электроды, 5 – гелиевый пузырек, 6 – система подачи пузырьков гелия, 7 – видео камера.

Электрическая схема установки показана на рисунке 5. Напряжение на ячейке устанавливалось вручную путем регулирования входного напряжения на лабораторном трансформаторе в диапазоне от 11 В до 17 В.

Для видео регистрации процесса использовалась видео камера с частотой 1200 кадров в секунду.

В качестве диэлектрика используется трансформаторное масло. Перед экспериментом масло было дополнительно высушено, так как наличие влаги существенно уменьшает электрическую прочность масла.

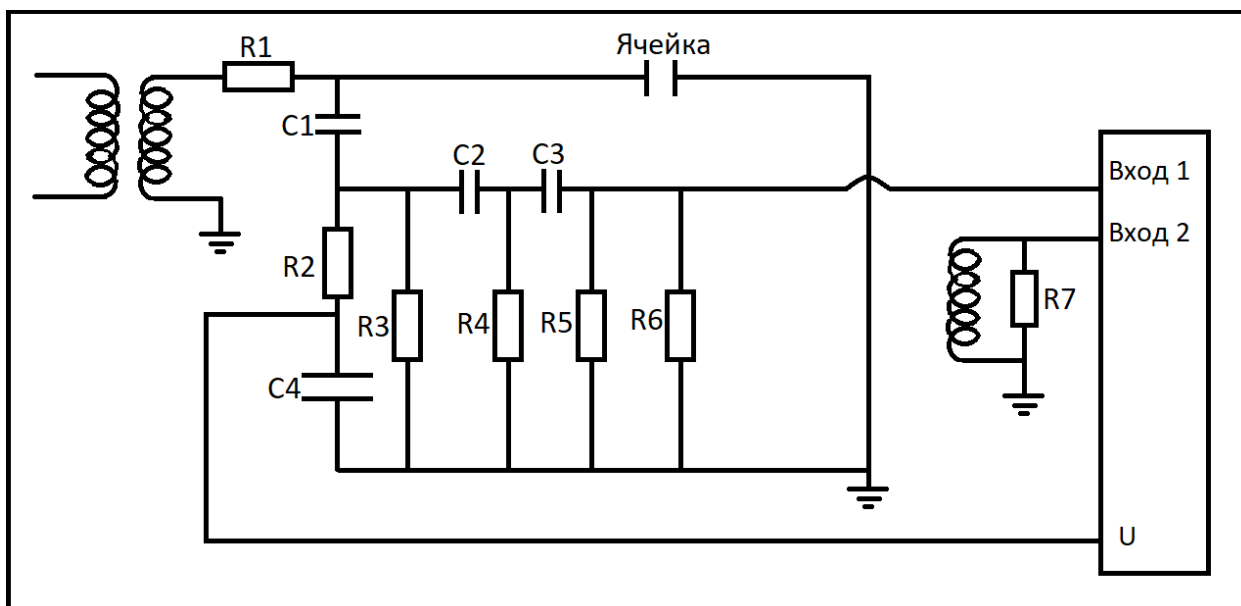


Рис. 5. Электрическая схема установки.

Электрические сигналы ЧР во всплывающем пузырьке регистрируются двумя способами: 1) с использованием подключённого трансформатора в цепь заземления; 2) используя обычную схему регистрации ЧР. Электрическая часть экспериментальной установки (рис. 5) состояла из высоковольтного трансформатора, конденсатор связи, экспериментальной ячейки, трансформатора тока, схемы регистрации ЧР и осциллографа.

Электрическая часть экспериментальной установки (рис.5) состояла из высоковольтного трансформатора 190 В / 140 кВ на который подавалось переменное напряжение частотой 50 Гц, где его амплитуда увеличивается в 733 раза. Сопротивление $R1 = 28 \text{ кОм}$ выполняет роль ограничителя тока после пробоя межэлектродного зазора. Так же принимает роль фильтра от шума, который образуется от частичных разрядов, который поступает в систему регистрации. ТВО-60 Вт низко индуктивные резисторы. Обеспечивает хорошую фильтрацию шума значение выбрано экспериментально 28 кОм . Конденсатор связи $C1 = 7.33 \text{ нФ}$ (СМАИВ-110/ 3-7.33 нФ). Делители напряжения $C1$ и $C4$ (емкостного), чтобы подать сигнал на выход и показать на осциллографе. Далее напряжение подается на ячейку. [4]

3.2 Приготовление смеси углеродных нанотрубок с трансформаторным маслом

Для создания центров инжекции заряда в трансформаторное масло были добавлены углеродные нанотрубки. Известно, что сухие нанотрубки образуют комки, которые малопригодны для приготовления однородной смеси с диэлектрической жидкостью. Поэтому, использовалось готовая смесь производства фирмы "OCSIAL", содержащая 0,2 % углеродных нанотрубок в смеси 0,4% поливинилбутираля в изопропиловом спирте, в которой нанотрубки распределены достаточно однородно.



Рис. 6. Раствор нанотрубок перемешанный магнитной мешалкой.

Сначала раствор нанотрубок был тщательно перемешан с трансформаторного маслом (6 мл на 1 литр трансформаторного масла(рис. 6.)) с помощью магнитной мешалки. Затем этот раствор был помещен в экспериментальную ячейку и подвергся действию переменного высокого напряжения амплитудой 11,4 кВ. Наблюдался электрический пробой смеси. По-видимому, происходило формирование проводящих мостиков из нанотрубок, вдоль которых и формировался канал разряда. Так как нашей целью было получение частичного разряда в пузырьке без пробоя масляного промежутка, было решено уменьшить концентрацию нанотрубок в растворе. Часть раствора масла с нанотрубками сливалась и к остатку добавлялось чистое масло. Затем, полученная смесь снова подвергалась воздействию высокого напряжения. Эта процедура проводилась несколько раз до тех пор, пока мы не перестали наблюдать формирование разряда в жидкости. В

таблице 1 приведены массовые концентрации нанотрубок на разных этапах разведения смеси и результат воздействия высокого напряжения на этот раствор.

Таблица №1. Выбор концентрации нанотрубок.

Измерение №	Концентрация нанотрубок, мл / л	Амплитудное значение напряжения, кВ	Результат
1	6	11,3	Пробой масла
2	2,4	11,3	Пробой масла
3	0,48	11,3	Пробой масла
4	0,096	11,3	Пробой масла
5	0,0192	12,4	ЧР пузырька без пробоя масла

В таблице 1 в строке 5 показана концентрация раствора нанотрубок, при которой наблюдался частичный разряд в пузырьке, но не наблюдался пробой жидкости при напряжении ниже 13,5 кВ (амплитудное значение). Точно рассчитать концентрацию нанотрубок в камере с маслом проблематично. Оценки показывают, что массовая концентрация самих нанотрубок для пятого разведения была $1,13 \cdot 10^{-8}$. Полученная концентрация: 0,0192 мл на камеру с маслом, объём камеры 850 мл.

В ходе эксперимента были проведены серии измерений напряжений, при которых происходил пробой диэлектрика при разных концентрациях нанотрубок.

Второй эксперимент заключался в том, чтобы получить раствор, в котором распределение концентрации нанотрубок в масле было как можно более равномерным. Были взяты две пробирки по 50 мл. Каждая пробирка содержала по 6,5 мл раствора нанотрубок и 43,5 мл масла. Далее смеси из этих пробирок размешивались в ультразвуковой мешалке мощностью 600 Вт.



Рис. 7. Ультразвуковая мешалка.

Для проведения эксперимента в камеру с чистым маслом добавляли по 1 капле полученного концентрата нанотрубок в трансформаторном масле (1 капля пипетки составляет 0,5 мл раствора). В одной капле содержится 0,00747 мл раствора нанотрубок. Смесь тщательно перемешивалась магнитной мешалкой (рис. 7). Полученная концентрация сопоставима с концентрацией с предыдущего эксперимента (таблица 1, строка 5). Затем этот раствор помещался в экспериментальную ячейку и подвергался действию переменного высокого напряжения амплитудой 11,4 кВ.

В ходе эксперимента было выявлено, что с помощью ультразвуковой мешалки нельзя добиться идеального раствора нанотрубок в масле.

3.3. Измерение напряжения пробоя трансформаторного масла и с добавлением нанотрубок

В ходе эксперимента при высокой концентрации нанотрубок в масле происходил электрический пробой в масле. Нанотрубки способствовали этому следующим образом. При очень высокой концентрации нанотрубок они выстраиваются друг за другом вдоль линии напряженности между электродами. Эти проводящие мостики обеспечивали разряд между электродами.

Для 11 Вольт



Рис. 8. Напряжение 11 кВ.



Рис. 9. Отсутствует напряжение.

При напряжении 11 кВ не было зафиксировано частичного разряда пузырька. Картинка 8 показывает, как себя ведут нанотрубки при подачи напряжения на электроды. Нанотрубки выстраиваются вдоль линий напряженности электрического поля (вертикальна на рисунке). Поляризация нанотрубок в электрическом поле приводит к их взаимодействию между собой, коагуляции в “нити”, ориентированные вдоль поля. На рисунке 9 показано фотография разрядного промежутка в отсутствие напряжения. Когда нет напряжения на электродах, я не наблюдал формирования “ниток” и “мостиков” из нанотрубок между электродами.



Рис. 10. Напряжение 12 кВ



Рис. 11. Напряжение 12 кВ, изменение формы пузырька после ЧР.



Рис. 12. Напряжение 12 кВ, разрыв пузырька после ЧР.

При достижении напряжении 12 кВ начали происходить гидродинамические явления. На приведенной серии картинок (рис. 10, 11, 12) видим деформацию пузырька. Она связана с частичным разрядом внутри пузырька. На рисунке 10 не видно изменений формы пузырька. На рисунке 11 видно изменение формы пузырька. Так же видно изменение местоположения в смотровом окне (в данном случае пузырек сместился вверх). На рисунке 12 видим образование двух новых пузырьков вследствие разрыва первичного пузырька под действием электрических сил. Все это свидетельствует о частичном разряде внутри пузырька.

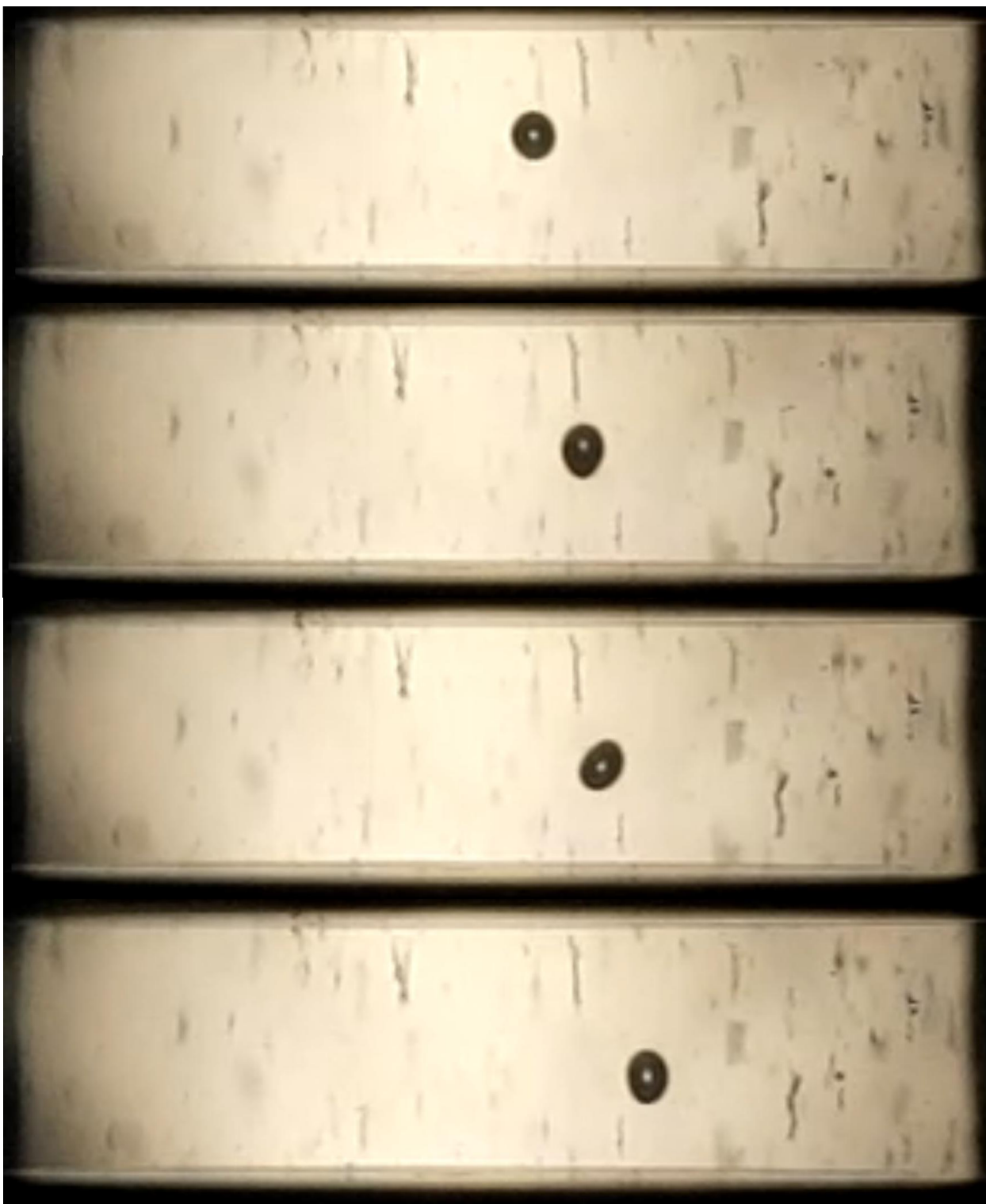


Рис. 13. Серия картинок с гидродинамическим течением.

На рис. 13. представлена серия картинок. Пузырек изменяет свою траекторию пути на протяжении всей серии. Кроме того, наблюдается изменение формы пузырька. Изменение формы пузырька является нетипичным для случая ЧР и не наблюдается без добавления нанотрубок. Это свидетельствует о развитии гидродинамического течения внутри ячейки с маслом. Мы считаем,

это вызвано инъекцией электронов с нанотрубок, находящихся в объёме и на поверхности электродов.

4. Заключение

В работе исследовано влияние углеродных нанотрубок на возможность инициирования частичных разрядов в газовых пузырьках трансформаторном масле под действием высокого напряжения. Показано что добавление раствора нанотрубок в трансформаторное масло в малых концентрациях действительно приводит к снижению напряжения инициирования ЧР в пузырьках до значений, практически соответствующих закону Пашена. Вероятнее всего, это связано с инъекцией электронов в жидкость с вершин нанотрубок. Определена максимальная концентрация нанотрубок при которой наблюдается ЧР в пузырьке, но не наблюдается пробой масла. Зарегистрирована динамика пузырьков после ЧР в них: разрыв пузырька электродинамическими силами, изменение формы пузырька. Наблюдались электрогидродинамические течения в разрядном промежутке, Вероятнее всего связанные с инъекцией заряда из нанотрубок.

5. Список литературы

1. А. Зоммерфельд. Электродинамика. М.:Изд-во Иностранной литературы, 1958, с. 502.
2. Korobeynikov S. M., Ridel A. V., Karpov D. I., Ovsyannikov A. G., Meredova M. B. Mechanism of partial discharges in free helium bubbles in transformer oil IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 26, Is. 5, Oct. 2019. P. 1605 – 611
3. Korobeynikov S.M., Karpov D.I. Ridel A.V., Ovsyannikov A.G., Meredova M.B., Kupershtokh A.L. Experimental study and numerical simulation of partial discharges in deformed bubbles in transformer oil. 2019 IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Rome, Italy, 2019. P. 1-4.
4. Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков. Томск: Изд-во ТПУ, 2003.-244с.
5. Korobeynikov S. M., Ridel A. V., Medvedev D.A., Karpov D. I., Ovsyannikov A. G., Meredova M. B. Registration and simulation of partial discharges in free bubbles at AC voltage. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume: 26 , Issue: 4 , Aug. 2019. P. 1035 - 1042.