

## В в е д е н и е

**Актуальность работы.** Явление электрического разряда в жидкостях исследуется на протяжении более чем ста лет. Несмотря на это, до сих пор нет адекватного теоретического описания всей последовательности многочисленных физических явлений, сопровождающих пробой диэлектриков. Еще в 1973 г. В. Я. Ушаков отмечал, что «в литературе в качестве равнозначных рассматривались более 15 различных теорий пробоя жидкостей, основанных на противоречивых исходных физических идеях». Однако, благодаря исследованиям групп Комелькова В.С., Liao T.W., Anderson J.G., Lewis T.J., Ушакова В.Я., Вершинина Ю.Н., Lesaint O. и других выявлены основные процессы, которые приводят к замыканию межэлектродного промежутка плазменным каналом.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные в последние три-четыре десятилетия в России и за рубежом, показали, что начало процессов ионизации в самой жидкости или в парогазовых пузырьках не является достаточным условием пробоя жидкого диэлектрика. Пробой возникает вслед за развитием в диэлектрике и замыканием разрядного промежутка разрядной структурой. Рост разрядных структур, образованных разветвленными плазменными каналами, носит нерегулярный, стохастический характер и обусловлен множеством взаимосвязанных электрических, гидродинамических, оптических и других явлений, что осложняет изучение этого явления. Тем не менее, в последние десятилетия экспериментаторы достигли значительных успехов в изучении формы, динамики, электрических характеристик разрядных каналов при различных условиях эксперимента (геометрии электродов, полярности, форме и длительности импульса напряжения, состоянии поверхности электродов, внешнем давлении и др.).

Однако, теоретического описания инициирования и развития разряда, которое учитывало бы стохастические закономерности этих процессов, сложную форму разрядных структур в пространстве, перераспределение электрических полей в разрядном промежутке, вызванного поляризацией, переносом заряда и развитием разрядных структур, и другие явления не существует.

В то же время, исследование поведения конденсированных диэлектриков в сильных электрических полях и процесс развития электрического разряда представляет значительный интерес не только для теории, но и для практического использования. Построение теоретических моделей развития разряда в жидкостях приобретает все большую актуальность в связи с необходимостью разработки новых более эффективных и экологически приемлемых изоляционных материалов. В последние годы рядом исследователей (Niemeyer L., Лопатин В.В., Куперштох А.Л., Dissado L.A. и др.) разрабатывается интегральный подход к описанию развития разрядных структур в зависимости от локального выделения энергии в жидкости или напряженности локального электрического поля на головках развивающихся разрядных каналов. Создание и последующее использование таких моделей, адекватно и с единой позиции описывающих предпробойные явления, позволит избежать значительных материальных расходов и сэкономить время, затрачиваемое на проведение физических экспериментов.

В связи с этим, тематика настоящей диссертационной работы, направленная, в конечном итоге, на создание новой, более совершенной модели развития разрядных структур в жидких диэлектриках, представляется актуальной.

**Цель работы** – разработка подхода и создание стохастической электродинамической модели роста проводящих разрядных каналов, а также численное моделирование развития разрядных структур в жидких диэлектриках.

**Методы исследования.** Для восстановления зависимостей плотности вероятности инициирования разряда от электрического поля  $\mu(E)$  использовались статистические методы обработки результатов измерений времен запаздывания и напряжений пробоя, а также компьютерное моделирование напряжений пробоя. Для решения интегрального уравнения, выражающего связь между значениями  $\mu(E)$  и средними статистическими временами запаздывания пробоя, использовался метод регуляризации некорректных задач. Для расчета гидродинамических течений от расширяющегося в жидкости цилиндрического канала разряда использовался численный метод Неймана–Рихтмайера. Для самосогла-

сованного расчета электрического поля в разрядном промежутке и переноса заряда вдоль каналов разрядных структур на каждом шаге по времени использовался неявный по времени консервативный конечно-разностный метод. Для моделирования случайных процессов использовался метод Монте-Карло.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивалась, прежде всего, качественным и количественным соответствием результатов компьютерного моделирования разрядных структур с данными оптической съемки, измерениями электрических и пространственно-временных характеристик разрядных структур при импульсном электрическом разряде в жидкостях. Достоверность также подтверждается использованием апробированных аналитических и численных методов решения уравнений модели, многочисленными тестовыми расчетами, совпадением результатов восстановления  $\mu(E)$ , полученных альтернативными методами обработки экспериментальных данных.

**На защиту выносятся:**

1. Методика расчета электрической прочности диэлектриков для любой геометрии электродов и формы напряжения по измеренным распределениям вероятностей времен запаздывания или напряжений пробоя для какой-либо геометрии электродов, а также методика моделирования мест инициирования разряда на поверхности электрода и напряжений пробоя при малых расстояниях между полусферическими электродами.
2. Гидродинамическая модель развивающегося разрядного канала, которая описывает его расширение со скоростями 30 — 300 м/с при джоулевом энерговыделении.
3. Геометрические, полевые и токовые характеристики разрядных каналов, полученные по разработанной модели развития разряда, в которой согласованно описывается рост ветвящихся каналов с учетом изменения их электропроводности и рассчитывается динамика распределения электрического поля в жидкости. Падение напряжения в нитевидных (“filamentary”) разрядных каналах в миллиметровых промежутках изменяется от 20 до 60 кВ/см при увеличении приложенного напряжения. Удельная электропроводность в раз-

вивающихся разрядных каналах составляет  $10^{-2} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  для медленных кустообразных (“bush-like”) разрядных структур и  $(1 - 10^{-1}) \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$  для быстрых древовидных (“tree-like”) структур.

**Научная новизна работы** заключается в развитии интегрального подхода, позволяющего детально описывать формирование разрядных структур в жидкостях. В рамках этого подхода совместное использование уравнений электродинамики и стохастического критерия роста разрядных структур позволило адекватно моделировать наблюдаемые в экспериментах формы структур, их полевые и токовые характеристики и динамику роста. Предложена приближенная модель, описывающая расширение отдельных участков развивающихся каналов и изменение их электропроводности.

**Практическая значимость работы.** Разработана методика прогнозирования электрической прочности н-гексана, перфтордибутилового эфира и трансформаторного масла для произвольных электродов и любой формы напряжения по восстановленной плотности вероятности статистических времен запаздывания пробоя или прочности, измеренных в каких-либо условиях.

**Апробация работы.** Материалы, вошедшие в диссертацию, докладывались автором и обсуждались на международных и региональных научных конференциях, международных школах-семинарах: региональной научно-практической конференции «Естественные науки» (г. Томск, 1994 г.), 2-ой Областной научно-практической конференции молодежи и студентов «Современные техника и технологии» (г. Томск, 1997 г.), XXXVI Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (г. Новосибирск, 1998 г.), VI Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей» (г. Санкт-Петербург, 2000 г.), X Международной научной школе-семинаре «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (г. Николаев, 2001 г.), IV Международной научной школе-семинаре «Импульсные процессы в механике сплошных сред» (г. Николаев, 2001 г.), 6 российско-корейском международном симпозиуме по науке и технологии KORUS 2002 (г. Новосибирск, 2002 г.), 14

Международной конференции по диэлектрическим жидкостям ICDL`2002 (г. Грац, Австрия, 2002 г.).

Диссертационная работа выполнялась в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете (1994 – 1997 гг.) и Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (1998–2003 гг.).

Значительная часть работы выполнялась при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты № 97-02-18416, 1998-1999 гг., № 03-02-16474, 2003 г.), Сибирского отделения РАН (Интеграционные проекты № 2, 1998-1999 гг. и № 47, 2000-2002 гг.), Международной Соросовской программы Образования в Области Точных Наук (ISSEP) (гранты s96-3130 и a97-145). Результаты работы были отмечены среди основных достижений СО РАН в 1999 и 2001 гг.

По теме диссертации опубликовано 25 работ, помещенных в списке литературы [1 – 25].

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. **Первая глава** посвящена обзору литературы. В результате анализа публикаций по экспериментальным исследованиям предпробойных явлений большого числа жидкостей сформулированы общие закономерности явления. Выделены основные фазы в развитии предпробойных процессов. На основании анализа известных статистических подходов, применяемых для описания инициирования пробоя, и существующих моделей роста разрядных структур формулируются основные направления исследований.

Во **второй главе** обосновывается новый статистический подход, применимый для определения электрической прочности конденсированных диэлектриков. Излагаются результаты экспериментов по пробое перфторированных органических жидкостей. С использованием нового подхода проводится сравнение электрической прочности экспериментально исследованных перфтордибутилового эфира, н-гексана и трансформаторного масла. Излагаются результаты компьютерного моделирования стохастических свойств инициирования пробоя в этих жидкостях.

В **третьей главе** излагается стохастическая модель роста разрядных структур при пробое жидких диэлектриков. Формулируются и обосновываются положения и уравнения модели. Описан вероятностный алгоритм роста разрядных структур. Подробно описан численный метод решения уравнений для расчета динамики полей и зарядов в разрядном промежутке.

В **четвертой главе** рассматривается модель канала разрядной структуры. Используя предположения о независимости расширения участков разрядного канала, проведены расчеты гидродинамических течений при расширении участков канала вследствие джоулева энерговыделения в нем. Предложена система обыкновенных дифференциальных уравнений, позволяющая приближенно описать изменение со временем радиуса, давления и скорости расширения каналов разрядной структуры.

В **пятой главе** проводятся результаты компьютерного моделирования развития разрядных структур. Проведено сравнение результатов моделирования с данными экспериментов по развитию разряда в миллиметровых промежутках в жидкостях при постоянном напряжении, на основании которого определены границы применимости модели. Проведено моделирование характеристик разрядных структур (формы, скорости роста, электрического тока, заряда и т.д.) при разных значениях приложенного напряжения. Исследована роль электропроводности разрядных каналов в формогенезе разрядных структур. Получены графики изменения вдоль каналов разрядных структур напряженности поля, плотности электрического заряда, электропроводности, радиуса канала, давления, и других характеристик каналов.