

ГРАНИЦЫ МЕХАНИЗМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ Н-ГЕКСАНА В КВАЗИОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

В. Ф. Климкин

С помощью высокоскоростной лазерной шпирен-регистрации и статистического анализа исследовался электрический пробой н-гексана в квазиоднородном поле при напряженностях $\sim 0.9\text{--}2.1$ МВ/см. Показано существование трех механизмов пробоя. Один соответствует электрическому разряду с катода, а два — с анода. Определены границы механизмов пробоя и их зависимость от длины разрядного промежутка. Установлена прямая корреляция результатов оптических и статистических исследований. Анализ полученных результатов показывает, что существование некоторого критического времени и расстояния между электродами связано с переходом от механизма пробоя с катода («пузырькового») к электрическому разряду с анода, содержащему в себе элементы и «пузырькового», и пониженного механизма пробоя.

В работе [1] с помощью высокоскоростной лазерной шпирен-регистрации установлены интересные особенности электрического пробоя н-гексана в квазиоднородном поле. Оказалось, что в зависимости от длительности воздействия напряжения (величины поля) электрический разряд развивается или с катода, или с анода, или с обоих электродов одновременно. Инициирование разряда в жидкости то с катода, то с анода в условиях однородного поля наблюдалось в белом минеральном [2], трансформаторном масле [3] и дистиллированной воде [4, 5]. Развитие этих исследований является важным как для физики электрического пробоя, так и практического использования жидких диэлектриков в различных электрофизических устройствах.

В данной работе сообщаются экспериментальные результаты, касающиеся границ реализации различных механизмов электрического пробоя н-гексана в квазиоднородном поле и их зависимости от длины разрядного промежутка.

Экспериментальная установка включала в себя разрядную камеру, генератор импульсных напряжений и оптическую шпирен-систему с лазерным источником освещения. Промежуток образовывался двумя полусферическими электродами из нержавеющей стали радиусом 5 мм. Импульс напряжения с амплитудой 10—30 кВ имел длительность фронта ~ 10 нс, а плоской части ~ 5 мкс. Длительность импульса рубинового лазера ~ 5 нс. Опыты проводились с химически чистым н-гексаном (удельное сопротивление $\geq 10^{12}$ Ом·см), электроды и жидкость дегазации не подвергались. Одновременно с оптической визуализацией предпробивных явлений в разрядном промежутке проводился анализ статистических распределений времени запаздывания пробоя в зависимости от напряженности поля. Для получения статистических распределений и оперативной в процессе эксперимента обработки данных использовался измерительно-вычислительный комплекс на базе микроЭВМ «Электроника-60».

На рис. 1 приведены зависимости времени запаздывания пробоя н-гексана от напряженности поля для двух длин разрядного промежутка. Каждая точка получена в результате усреднения 100—150 измерений. Черточки показывают величину среднеквадратичного отклонения результатов измерений. Горизонтальные штриховые линии соответствуют квазистатическому пробивному полю. Анализ большого числа шпирен-фотографий позволил выявить границы реализации различных механизмов электрического пробоя н-гексана. На рис. 1 они

обозначены вертикальными сплошными и штриховыми линиями для длин разрядного промежутка 150 и 100 мкм соответственно. В области 1 пробой осуществляется разрядом с катода. Картина развития электрического разряда с катода соответствует «пузырьковому» механизму пробоя. При этом основные ионизационные процессы, приводящие к зарождению и развитию электрического разряда, протекают в парогазовой фазе. Скорости развития разряда с катода $\sim 10^4 - 10^5$ см/с. В области 3 пробой осуществляется разрядом с анода. Электрический разряд с анода имеет начальную (более медленную) «пузырьковую» стадию. На последующих стадиях разряд имеет форму кистевого и распространяется к катоду с более высокой скоростью $\geq 10^6$ см/с за счет развития ионизационных процессов в самой жидкости (интенсивный разряд). При напряженностях поля $\sim 1.9 - 2.1$ МВ/см (расстояние между электродами 100 мкм) одновременно с описанным выше реализуется другой механизм пробоя с анода. Он имеет форму однородного разряда с размытыми границами [6]. Характерным является то, что при его зарождении не удается обнаружить «пузырьковой» стадии. Элек-

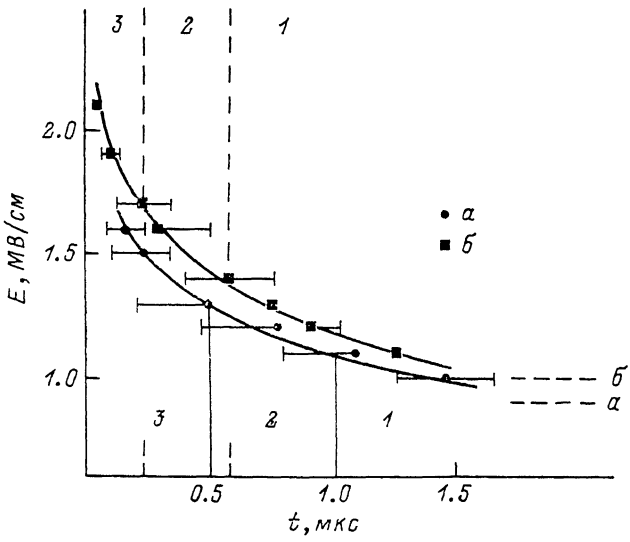


Рис. 1. Зависимость времени запаздывания пробоя н-гексана от напряженности поля для расстояния между электродами 150 (а) и 100 мкм (б).

трический разряд развивается сразу с большой скоростью, примерно равной скорости кистевого разряда. Отсутствие заметного влияния внешнего давления на этот разряд с анода указывает на то, что он соответствует ионизационному механизму пробоя. Область 2 является переходной. В этой области пробой осуществляется разрядами и с катода, и с анода. Ширина переходной области (в масштабе времени) уменьшается при уменьшении расстояния между электродами. Из сравнения данных, приведенных на рис. 1, следует, что при увеличении межэлектродного расстояния границы механизмов электрического пробоя н-гексана соответствуют более низким значениям напряженности поля, т. е. смещаются в область больших длительностей воздействия напряжения. Поэтому в условиях пробоя с катода увеличение длины разрядного промежутка (при постоянной напряженности поля) приводит к механизму пробоя с анода. Например, для напряженности поля ~ 1.3 МВ/см критическое расстояние между электродами, соответствующее изменению механизма пробоя, равно примерно 150 мкм. С увеличением напряженности поля критическое расстояние уменьшается. Следует отметить, что развитие электрического разряда от катода, или с анода в зависимости от длины разрядного промежутка наблюдалось также в дистиллированной воде [7].

Рассмотрим результаты статистических исследований. На рис. 2 представлены типичные гистограммы распределения времени запаздывания пробоя в н-гексане при различных напряженностях поля и расстоянии между электродами 100 мкм. Увеличение напряженности поля приводит к существенному изме-

нению вида распределений. Сопоставление с результатами оптических наблюдений показывает, что это обусловлено различными механизмами пробоя н-гексана. Распределение на рис. 2, а соответствует пробое с катода. Обращает на себя внимание появление второго максимума в распределении на рис. 2, б. В этих условиях сосуществуют и конкурируют примерно с равной вероятностью механизмы пробоя и с катода, и с анода. Причем первый максимум (левый) коррелирует с пробоем с анода, а второй — с катода. Распределение на рис. 2, в соответствует пробое с анода.

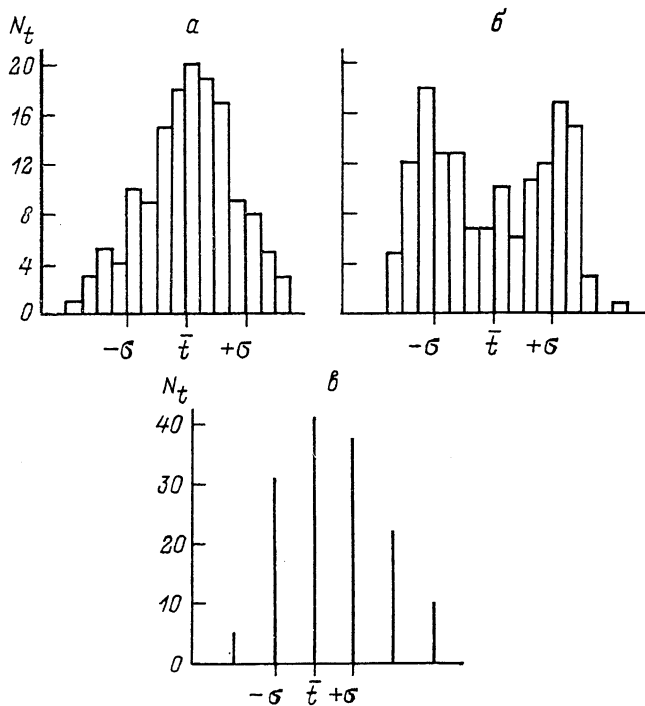


Рис. 2. Гистограммы распределения времени запаздывания пробоя в н-гексана при различных напряженностях поля E .

Полное число измерений в каждой серии 150, \bar{t} — среднее время запаздывания пробоя, σ — среднеквадратичное отклонение результатов измерений; E , МВ/см: а — 1.2, б — 1.6, в — 2.1; \bar{t} , нс: а — 900, б — 310, в — 50; σ , нс: а — 120, б — 160, в — 10.

Таким образом, в условиях квазиоднородного электрического поля в зависимости от величины поля реализуются три различных механизма пробоя н-гексана. Один соответствует электрическому разряду с катода, а два — разряду с анода.

Значение полученных результатов заключается в том, что они позволяют более детально и убедительно объяснить установленный свыше 30 лет назад факт быстрого увеличения электрической прочности н-гексана при временах, меньших некоторого критического времени (≤ 1 мкс в зависимости от расстояния между электродами) [8]. Ранее для объяснения этого факта привлекался механизм пробоя, основанный на эмиссии электронов с катода, последующем их размножении за счет ударной ионизации и образовании лавин электронов в самой жидкости [9]. Из анализа приведенных результатов следует, что это связано с переходом от механизма пробоя с катода («пузырькового») к электрическому разряду с анода, содержащему в себе элементы и «пузырькового», и ионизационного механизмов пробоя. Для его возникновения требуются более высокие напряженности поля, и он имеет более высокие скорости развития. Иницирование разряда с анода не может быть объяснено эмиссией электронов с катода. В [10] предполагается, что это обусловлено первичным ионизационным (стримерным) процессом вблизи поверхности анода, сопровождающимся фазовым переходом. При еще более высоких напряженностях поля создаются усло-

вия для прямого иницирования интенсивного разряда (однородный разряд). Время его развития уменьшается за счет отсутствия «пузырьковой» стадии. Этот механизм пробоя с анода, по-видимому, будет преобладающим при длительности воздействия напряжения ≤ 10 нс.

Из полученных данных вытекает, что в квазиоднородном поле разряд с анода начинается при большем напряжении на промежутке по сравнению с катодом, и эффект полярности является обратным тому, который наблюдается в промежутках с резко неоднородным полем [11].

Критическому времени придается большое значение в теории электрического пробоя, поскольку оно используется при вычислении подвижности носителей заряда в сильных полях [8]. Учитывая сложный характер электрического разряда с анода, следует особо отметить, что к таким оценкам подвижности носителей заряда следует относиться с определенной осторожностью.

На существование критического расстояния между электродами в н-гексане указывалось ранее в работе [12]. С позиций электронного механизма пробоя предполагалось, что оно определяется условием создания в лавине критического объемного заряда, необходимого для преобразования лавины в стример. Как следует из приведенных результатов, при превышении критического расстояния электрический разряд развивается с анода. Высокие скорости распространения кистевого разряда как раз и приводят к слабой зависимости времени запаздывания пробоя от длины разрядного промежутка при межэлектродных расстояниях, больших критического [12].

Прямая корреляция результатов оптических и статистических исследований значительно повышает эффективность статистического анализа и открывает новые возможности при изучении влияния различных факторов (внешнего давления, температуры, примесей и др.) на механизмы пробоя с катода и с анода.

Список литературы

- [1] Климкин В. Ф. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 10. С. 2041—2043.
- [2] Devins J. C., Rzad S. J., Schwabe R. J. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 31. N 5. P. 313—314.
- [3] Kelley E. F., Hebner R. E. // Appl. Phys. Lett. 1981. Vol. 38. N 4. P. 231—233.
- [4] Авроров А. П., Воробьев В. В. Препринт ИЯФ АН СССР. № 83-69. Новосибирск, 1983, 32 с.
- [5] Комин С. Н., Кучинский Г. С., Морозов Е. А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 9. С. 1826—1829.
- [6] Бородин В. П., Климкин В. Ф. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 9. С. 802—805.
- [7] Климкин В. Ф. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 4. С. 805—807.
- [8] Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л.: Энергия, 1972. 294 с.
- [9] Kao K. C., Nigham J. B. // J. Electrochem. Soc. 1961. Vol. 108. N 6. P. 522—528.
- [10] Климкин В. Ф., Пономаренко А. Г. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 9. С. 1896—1904.
- [11] Ушаков В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей. Томск, 1975. 256 с.
- [12] Arii K., Kitani I., Kawamura M. // J. Phys. D. 1979. Vol. 12. P. 787—796.

Новосибирский
государственный университет
им. Ленинского комсомола

Поступило в Редакцию
19 июня 1990 г.
В окончательной редакции
12 декабря 1990 г.