

04

О влиянии одиночных пузырьков газа на электрический пробой трансформаторного масла

© А.В. Недоспасов, Э.Х. Исакаев, А.С. Тюфтяев, М.Х. Гаджиев

Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия
e-mail: makhach@mail.ru

(Поступила в Редакцию 5 ноября 2014 г.)

Экспериментально исследовано влияние одиночных пузырьков газа на пробой трансформаторного масла. Показано, что в пузырьках происходят периодические разряды при полях ниже напряжения пробоя масла.

Введение

Известно, что электрический пробой в жидкостях начинается с возникновения первичной искры. Ее возникновение не всегда приводит к зажиганию стабильного разряда, так как восстанавливается электрическая прочность диэлектрика.

В настоящее время нет универсальной теории, описывающей электрический пробой в жидких диэлектриках. Это связано со сложностью процессов и с тем, что пробой в различных диэлектриках в зависимости от условий может иметь разный механизм. В.Я. Ушаков разделил существующие теории пробоя на пробой в газовых пу-

зырьках и пробой в самой жидкости [1]. Пузырьки могут присутствовать в жидкости изначально либо образовываться в ней в результате нагрева, электролиза, кавитации и т.д. В практической электроэнергетике влияние пузырьков газа на пробой может быть существенным.

Электрическая прочность газов значительно ниже электрической прочности трансформаторного масла, поэтому частичный разряд может происходить в газовом пузырьке в полях, меньших, чем необходимо для пробоя масла. Представляют интерес исследования зависимостей пробивного напряжения трансформаторного масла от химического состава, размеров и концентрации пузырьков различных газов.

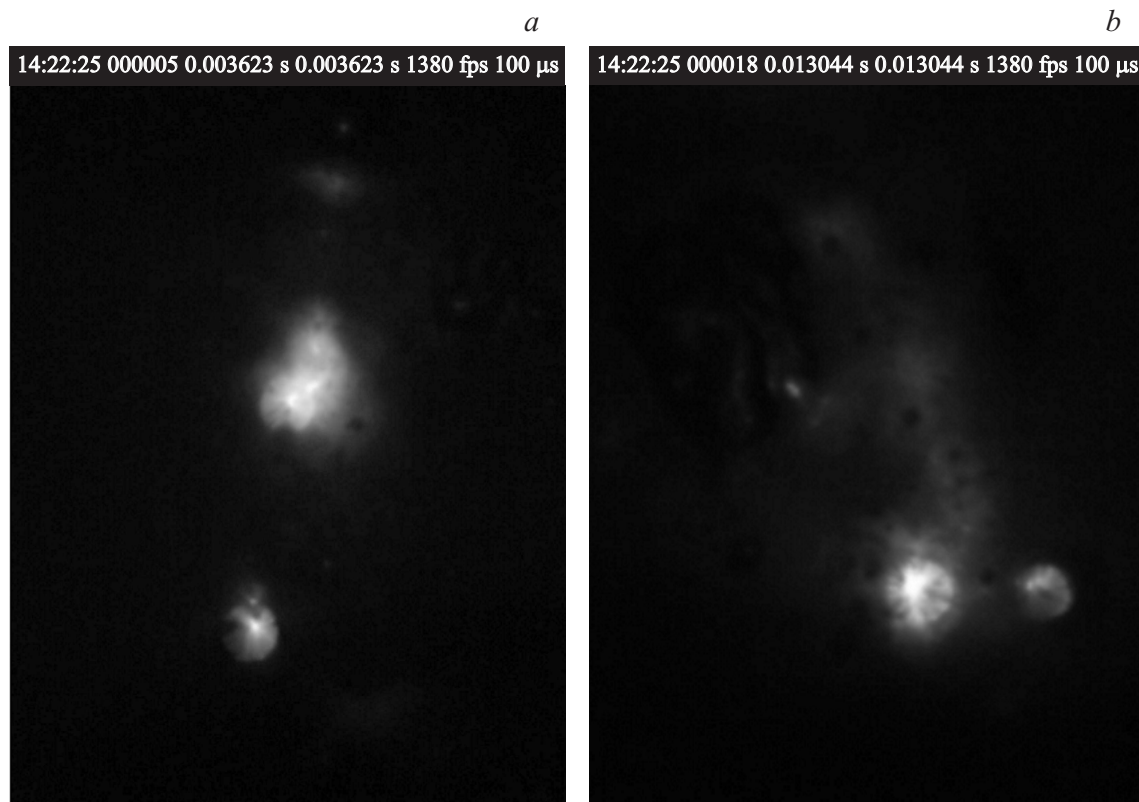


Рис. 1. Скоростная визуализация процесса пробоя пузырька с газом.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Эксперименты по электрическому пробую трансформаторного масла с одиночными пузырьками газа проводились на установке, описанной в [2]. Одиночные пузырьки газа с радиусом порядка $R = 0.1$ см располагались между электродами. Напряжение между электродами увеличивалось постепенно до возникновения пробоя.

Для регистрации процессов пробоя использовалась высокоскоростная камера (Motion Pro X3 США) с трехцветной матрицей (1248×1008 пикселей) с диагональю 19.7 мм. Съемка производилась с частотой кадров 1–10 kHz и минимальной экспозицией $1 \mu\text{s}$. В сочетании с длиннофокусным объективом камера регистрировала изображение в масштабе 1:3 в течение всего периода наблюдения с сохранением в буферной памяти до 3000 кадров.

Скоростная съемка показала, что в масле на значительном расстоянии от электродов наблюдалась вспышка сферической формы (рис. 1).

Яркое белое пятно внутри сферы связано слабосветящимися каналами с ее поверхностью. При напряжениях между электродами, меньших, чем необходимо для пробоя масла, сначала пробой происходит в газовом пузырьке и не всегда сопровождается перекрытием разрядного промежутка высокопроводящим каналом. На рис. 2 представлены полученные результаты.

Напряжение пробоя трансформаторного масла с одиночными пузырьками уменьшается в сравнении с чистым маслом и зависит от рода газа.

До полного перекрытия промежутка наблюдался многократный пробой в пузырьке с частотой несколько сотен Герц. В типичном эксперименте интервалы между

четырьмя последовательными разрядами в пузырьке в миллисекундах оказались следующими: 3.62, 5.80, 1.45.

Под действием внешнего электрического поля на поверхности пузырька появляются разноименные заряды, при этом напряженность электрического поля в пузырьке будет в ϵ_m раз больше напряженности поля в масле (ϵ_m — диэлектрическая проницаемость масла, диэлектрическая проницаемость газа принимается равной единице). Как известно, напряженность поля в масле в ϵ_m раз меньше внешнего электрического поля E , определяемого как разность потенциалов между электродами, деленная на расстояние между ними. Максимальная электрическая энергия в пузырьке до пробоя $W_1 = \frac{E^2 R^3}{6}$. Если после пробоя напряженности в масле и пузырьке выравниваются, то энергия в пузырьке $W_2 = \frac{E^2 R^3}{6\epsilon_m^2}$. Энергия, выделяющаяся в пузырьке при однократном пробое по порядку величины,

$$\Delta W = \frac{E^2 R^3}{6} \left(1 - \frac{1}{\epsilon_m^2} \right).$$

Для внешнего электрического поля с напряженностью $E = 100$ kV/cm, $\epsilon_m \approx 2$ и $R = 0.1$ см, $\Delta W \approx 14 \cdot 10^{-7}$ J.

Если бы в пузырьке происходил многократный пробой с частотой 250 Hz, то за одну секунду в нем выделилось бы $3.5 \cdot 10^{-4}$ J, что повысило бы температуру прилегающего масла и могло бы повлиять на напряжение пробоя.

Полученный здесь результат не переносится на пробой с большим количеством пузырьков, если их объем достигает 10–20% объема смеси.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-12-01295.

Авторы благодарят сотрудников, работающих на экспериментальной установке, за проведенные исследования и полученные результаты.

Список литературы

- [1] Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 488 с.
- [2] Гаджиев М.Х., Исакаев Э.Х., Тюфтяев А.С., Акимов П.Л., Юсупов Д.И., Куликов Ю.М., Панов В.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 7. С. 156–158.

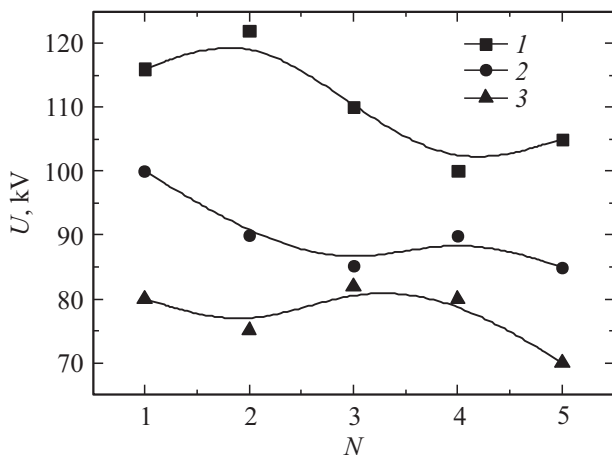


Рис. 2. Пробивное напряжение чистого (1) и газированного одиночными пузырьками элегаза (2) и воздуха (3) трансформаторного масла.