

ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ НА РАЗРЯДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ГАЗОВ ПРИ БОЛЬШИХ ДАВЛЕНИЯХ

Докт. техн. наук ШАХТАХТИНСКИЙ Т. И.

Азербайджанская государственная нефтяная академия

Экспериментальные данные о пробивных напряжениях в различных газах под давлением показывают, что при больших давлениях нарушается закон подобия разрядов в газах: с увеличением давления газа рост пробивного напряжения замедляется [1–3]. На рис. 1 представлены зависимости разрядного напряжения воздуха от произведения давления p и межэлектродного расстояния l для неизменного значения $l = 5 \cdot 10^{-3}$ м и различных значений p между плоскими электродами.

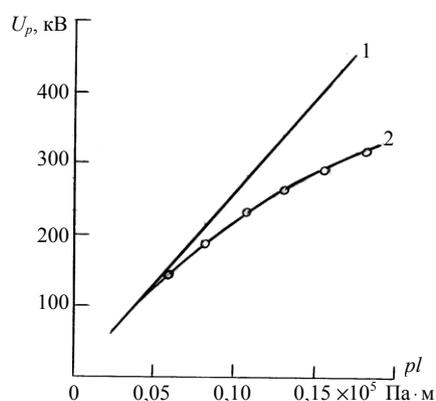


Рис. 1. Зависимости разрядного напряжения воздуха между плоскими электродами от произведения давления p и межэлектродного расстояния l

Кривая 1 является теоретической и получена расчетным методом с помощью эмпирической формулы

$$U_p = 0,237pl + 0,636\sqrt{pl},$$

предложенной [4], кривая 2 — экспериментальная, взята из [3]. Согласно закону подобия разрядов в газах экспериментальная зависимость $U_p = f(pl)$ (кривая 2) должна подчиняться ходу теоретической зависимости (кривая 1). Однако, как видно из кривых зависимостей, с увеличением давления, особенно в области больших давлений, в экспериментальной зависимости наблюдается отклонение прямолинейности в низшую сторону.

В [2] нами было показано, что причиной наблюдаемого отклонения от закона подобия разрядов в газах в области больших давлений является наличие на поверхности электродов микроскопических выступов. При атмосферных и околоатмосферных давлениях длина свободного пробега электронов соизмерима с размерами участков усиленных полей микровыступов и электроны выходят из этих зон, не производя эффективных

столкновений. С повышением давления увеличивается число столкновений частиц в объеме газа, в том числе и на участке усиленных полей микровыступов. Чем выше давление газа, тем больше удельное значение столкновений частиц, попадающих в зону локально усиленных полей, и тем ниже значение пробивного напряжения промежутка.

Как известно, с целью уменьшения влияния микровыступов на электрическую прочность газов при повышенных давлениях поверхность электродов высоковольтных газонаполненных распределительных устройств покрывается тонким слоем полимерной или оксидной диэлектрической пленки [5, 6]. Однако из [5, 7] известно также, что в большинстве случаев наблюдается обратное явление: при больших давлениях газа разрядное напряжение между электродами с покрытой поверхностью оказывается меньше, чем у непокрытых электродов. Проведенные нами исследования методом моделирования условия, при котором возрастает удельная роль микровыступов на поверхности электродов в ионизационном процессе газового разряда при повышенных давлениях, позволили внести определенную ясность в суть явления, кажущегося на первый взгляд «парадоксальным».

Согласно [8, 9] высота выступов, имеющих на поверхности технически обработанных и полированных стальных электродов, не превышает $(10-20) \cdot 10^{-6}$ м. Как видно (кривая 2 зависимости $U_p = f(pl)$ на рис. 1), значению $pl = 0,15 \cdot 10^5$ Па·м при $l = 5 \cdot 10^{-3}$ м соответствует $p = 30 \cdot 10^5$ Па, т. е. 30 атм. Тогда при атмосферном давлении высота выступа на поверхности электрода при условии сохранения постоянства числа столкновений частиц, попадающих в зону усиленного поля микровыступа высотой 20 мкм, должна составлять $t = 20 \cdot 30 = 600$ мкм.

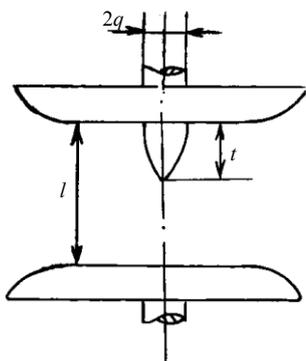


Рис. 2. Плоские электроды с закругленными краями с полуэллипсоидальным выступом

Эксперименты проводились следующим образом. В центральной части одного из плоских электродов с закругленными краями диаметром 55 мм в открытую щель вставлялся выступ в виде полуэллипсоида вращения из стали (рис. 2).

Для сохранения соотношения полуосей $t : q \approx 2,5$ при различных значениях t диаметр щели в центральной части электрода изменялся согласно размеру малой оси выступа $2q$. При постоянном межэлектродном расстоянии $l = 5 \cdot 10^{-6}$ м для значений $t = (0,2-0,8)$ мм, что соответствует значениям $p = (10-40)$ атм, определялись разрядные напряжения промежутка в

воздухе U_t при переменном напряжении. В качестве источника высокого переменного напряжения была использована испытательная установка АИМТИ-60. Напряжение измерялось с помощью омического делителя напряжения и астатического вольтметра с классом точности 0,5. Скорость подъема напряжения составляла 1–2 % в секунду от ожидаемого значения

пробивного напряжения. При этом наблюдались большие разбросы в значениях измерений – до 20 % среднеарифметического.

Значения U_t определялись с доверительной вероятностью 95 % после обработки не менее 15 измерений.

С помощью формулы $U_p = f(pl)$ было вычислено также значение U_p в воздухе при атмосферном давлении для $l = 5 \cdot 10^{-3}$ м и определялись соотношения разрядных напряжений с выступом U_t и без выступа U_p , т. е. $U_t : U_p$. Полученные значения для сопоставления со значениями $U_t : U_p$, определяемыми на основе данных рис. 1, приведены на рис. 3.

На рис. 3 сплошная линия построена на основе данных рис. 1, точки – на основе проведенных и изложенных выше экспериментов. Как видно, полученные результаты подтвердили идеи, заложенные в основу моделирования механизма влияния микрошероховатостей поверхности электродов на разрядное напряжение газов при больших давлениях. Это способствовало исследованию влияния диэлектрического покрытия поверхности электродов на U_p при больших давлениях в облегченных условиях эксперимента – в условиях атмосферного давления.

Эксперименты проводились следующим образом. При постоянном межэлектродном расстоянии $l = 2 \cdot 10^{-3}$ м (без учета t) для различных значений t определялись разрядные напряжения промежутка в воздухе при переменном напряжении. Результаты с доверительной вероятностью 95 % в виде зависимости $U_p = f(t)$ представлены на рис. 4 (кривая I, точки 1).

Эксперименты проводились и с нанесением на поверхность электродов с полуэллипсоидальным выступом диэлектрического покрытия из эпоксидной смолы. При этом выступ полностью исчезал под покрытием. Значения U_p определялись как среднеарифметическое из результатов пяти измерений. Разбросы U_p не превосходили 3 % среднеарифметического значения. Результаты эксперимента приведены на рис. 4 (кривая II, точки 2). Как видно, при наличии над выступом диэлектрического покрытия U_p увеличивается до значения разрядного напряжения между плоскими электродами без выступа.

Предполагалось, что аналогично роли металлических выступов в отклонении от прямолинейности характеристики $U_p = f(pl)$ играют роль

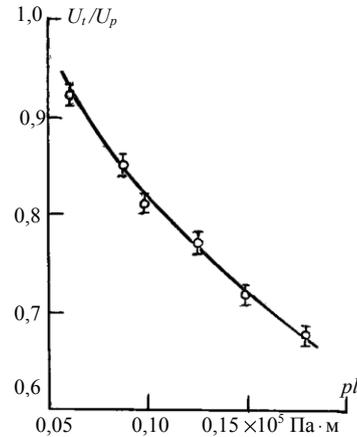


Рис. 3. Относительные значения разрядного напряжения воздуха между плоскими электродами в зависимости от pl

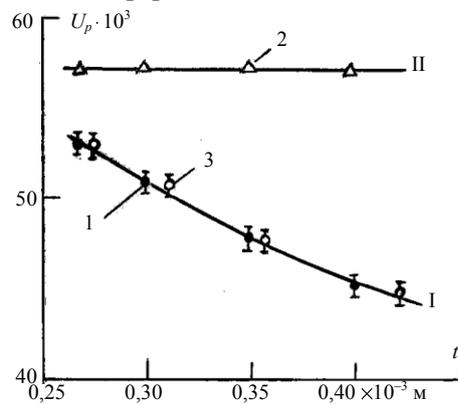


Рис. 4. Разрядное напряжение воздуха между плоскими электродами в зависимости от высоты выступа t на поверхности электрода

диэлектрические выступы (шероховатости) на поверхности изоляционного покрытия. Для подтверждения предположения после нанесения диэлектрического покрытия на центральной части поверхности электрода устанавливался полуэллипсоидальный выступ из материала покрытия. Результаты экспериментов, проведенных по изложенной выше методике, показали, что при наличии на поверхности покрытия диэлектрического выступа полуэллипсоидальной формы с теми же параметрами, что и металлический, U_p газа снижается до уровня U_p промежутка электродов с выступом без покрытия (кривая I, точки 3). Это свидетельствует о том, что причиной относительного снижения U_p с ростом давления между электродами с покрытой поверхностью является наличие на поверхности диэлектрического покрытия микровыступов, которые практически могут быть более крупных размеров, чем на металлической поверхности.

ВЫВОДЫ

1. При нанесении диэлектрического покрытия на поверхность электродов, если металлические выступы, имеющиеся на поверхности электродов, остаются под покрытием, электрическая прочность газа между электродами достигает значения, соответствующего прочности между теми же электродами без выступов.

2. При наличии на поверхности покрытия диэлектрического выступа с теми же параметрами, что и металлический, разрядное напряжение снижается до уровня разрядного напряжения промежутка электродов с выступами без покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. С к а н а в и, Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г. И. Сканава. – М.: Госиздат, 1958. – 908 с.
2. Ш а х т а х т и н с к и й, Т. И. Оценка влияния неоднородности, обусловленной шероховатостью поверхности электрода, на напряжение зажигания разряда в газе при больших давлениях / Т. И. Шахтаhtинский // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1977. – № 1–2. – С. 54–57.
3. S y s o e v, M. I. Peculiarities of compressed air breakdown in uniform field. International conference on gas discharges by IEE / M. I. Sysoev, V. V. Jakovlev. – London, 1970. – P. 361.
4. Р а з е в и г, Д. В. Расчет начальных и разрядных напряжений газовых промежутков / Д. В. Разевиг, М. В. Соколова. – М.: Энергия, 1977. – 178 с.
5. П о л т е в, А. И. Конструкция и расчет электрогазовых аппаратов высокого напряжения / А. И. Полтев. – Л.: Энергия, 1979. – 230 с.
6. B o r i n, V. N. Dielectric coatings for gas insulated high voltage equipment. IEE 6-th Intern. Conf. Gas Discharges / V. N. Borin, I. M. Bortnik. – London, 1980. – P. 208–211.
7. R e i n, A. Impulse breakdown of SF₆/N₂ insulation. Influence of electrode covering. Polarity effect. Gaseous Dielectric III / A. Rein, T. Kulsetas. – New York, Pergamon Press, 1982. – P. 315–321.
8. А б р у ц к и й, В. А. Влияние шероховатости электродов на пробивное напряжение и их разброс / В. А. Абрucкий // ЖТФ. – 1973. – Т. 43, № 4. – С. 620–627.
9. К у ч и н с к и й, Г. С. Изоляция установок высокого напряжения / Г. С. Кучинский, В. Е. Кизеветгер, Ю. С. Пинтал. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

Представлена кафедрой
электротермических установок
и техники высоких напряжений

Поступила 5.05.2006