

Б. Н. КЛЯРФЕЛЬД

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА

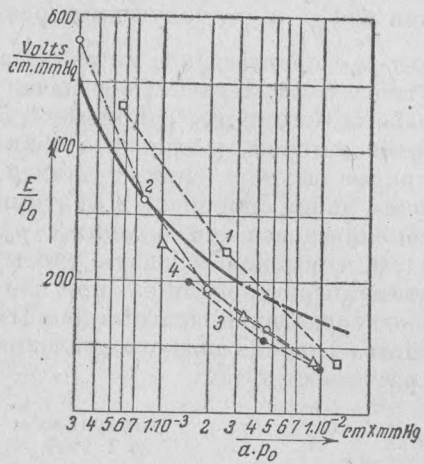
(Представлено академиком С. И. Вавиловым 5 II 1940)

Решение основной проблемы теории газового разряда—получение характеристик разряда из атомных свойств применяемого газа—может рассчитывать на успех в первую очередь при исследовании разряда низкого давления. Действительно, при низком давлении разрядные явления обладают максимальной простотой, что происходит из-за малого развития в этих условиях таких процессов, как ступенчатая ионизация, ступенчатое возбуждение и удары второго рода. Лэнгмюр и Тонкс⁽¹⁾, для наиболее простой области разрядного пространства—положительного столба, наметили для этих условий принципиальный путь вычисления основных величин в разряде с помощью совместного решения ряда уравнений. Эти уравнения связывают между собой такие искомые величины, как градиент потенциала E , электронная температура T_e , число электронов на 1 см длины столба N_e , плотность ионного тока, текущего на непроводящую стенку, I_p и, наконец, число пар ионов обоого знака, вновь образуемых каждым электроном плазмы в секунду, α . Проведение расчетов этим путем до сих пор еще не было выполнено вследствие сложности уравнений и недостаточности данных для их конкретного написания.

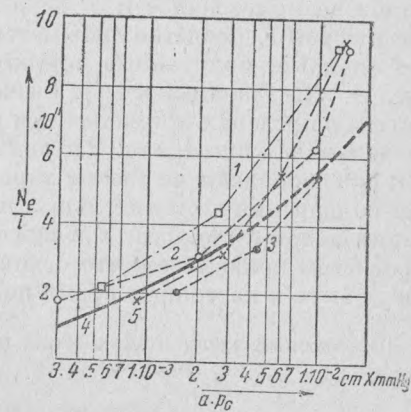
Материалы, полученные после появления работы Лэнгмюра и Тонкса, значительно расширили возможность применения количественных расчетов к явлениям в положительном столбе. Так, В. А. Фабрикант⁽²⁾ разработал метод расчета мощности излучения спектральных линий в столбе, используя данные для T_e и N_e . Сравнение результатов расчетов с опытом, сделанное Фабрикантом, показало вполне удовлетворительное совпадение. В предыдущих работах автора с разрядом низкого давления в парах ртути и калия было показано⁽³⁾, что уравнение равновесия плазмы, связывающее коэффициент α с электронной температурой, и уравнение для ионного тока на стенки, дающее соотношение между ионным током и электронной концентрацией, соблюдаются с достаточной степенью точности. Экспериментальное исследование продольного градиента давления в столбе, проведенное автором совместно с И. А. Полетаевым⁽⁴⁾, показало, что применение уравнения Ланжевена для подвижности электронов дает удовлетворительные результаты даже при таких низких давлениях, когда длина свободного пути электронов значительно превосходит диаметр столба. Далее, автором было найдено, что применение данных Ноттингема для кривой эффективности ионизации электронными ударами в парах ртути дает для коэффициента α значения, хорошо совпадающие

при низких давлениях с экспериментальными значениями α , полученными из зондовых измерений (5).

Все эти результаты позволили приступить к вычислению характеристик положительного столба как функций диаметра, давления и силы тока. В отличие от сделанного нами ранее расчета (3), в котором использовались упрощающие предположения, ограничивающие применимость расчетов лишь для крайне узкой области давлений (практически лишь для одной точки—самого низкого давления, при котором может еще существовать столб), в настоящем сообщении приводятся результаты вычислений, выполненных без упрощающих предположений. Тем самым эти результаты могут быть распространены на всю область разрядных условий, в пределах которой справедливы предпосылки теории плазмы низко-



Фиг. 1. Зависимость $\frac{E}{p_0}$ от значений $a \cdot p_0$: кривая 1—радиус столба 3,1 см, ток 5 А, кривая 2—радиус столба 1,6 см, ток 3 А, кривая 3—радиус столба 1,6 см, ток 1 А, кривая 4—радиус столба 1 см, ток 0,3 А.



Фиг. 2. Зависимость $\frac{N_e}{i}$ от значений $a \cdot p_0$. Для кривой 5 радиус столба 3,25 см; ток 1 А. Радиус столба и ток для остальных кривых тот же, что и на фиг. 1.

го давления. Вычисления проделаны только для ртутного разряда, так как для атома ртути известны все нужные константы элементарных процессов. Необходимые для расчета данные состояли из: а) таких констант, как постоянная Больцмана, заряд и масса электрона, масса положительного иона, потенциалы ионизации и возбуждения, б) безразмерных постоянных теории плазмы, в) действующего сечения для соударения электронов с ртутными атомами Q_0 , действующего сечения для ионизации Q_i и действующих сечений для возбуждения отдельных уровней Q_e и с) значений давления ртутного пара P_0 (отнесенного к 0°C), радиуса столба a и силы разрядного тока i .

Для выражения функциональных зависимостей Q_0 , Q_i и Q_e от энергии электронов применялись аппроксимации, возможно близко соответствующие опытным данным для этих функций. В итоге вычислений были получены функциональные зависимости для величин: E , N_e , T_e , α , I_p , B и η_w от радиуса столба и давления (B —отношение плотностей беспорядочного электронного тока к направленному, η_w —доля разрядной мощности, превращаемая в тепло у стенок вследствие происходящей там рекомбинации положительных ионов и электронов).

Так как в расчете не учитывались ступенчатые процессы, то полученные величины E , T_e и α не зависели от силы разрядного тока, что экспери-

ментально подтверждается для разряда при низких давлениях и не очень больших токах (3). Величины же N_e и I_p по расчету меняются пропорционально току. Измерения, однако, показывают, что они растут несколько быстрее силы разрядного тока, что вызывается уже вторичными эффектами, не учтенными в вычислениях, как, например, уменьшением λ_e с током вследствие появления в разряде заметной концентрации положительных ионов.

Полученные данные сравнивались с имеющимися в литературе экспериментальными измерениями. Оказалось, что не только абсолютные значения вычисленных и опытных данных удовлетворительно совпадали (в пределах порядка $\pm 30\%$), но и ход кривых имел одинаковый характер.

Для примера на фиг. 1 и 2 даются значения для $\frac{E}{p_0}$ и $\frac{N_e}{i}$, полученные разными авторами. По оси абсцисс отложено $a \cdot p_0$ — произведение из радиуса столба на приведенное к 0° давление ртутного пара. Кривые, обозначенные цифрой 1, представляют материалы работы Киллиана (6), кривые 2, 3 и 4 — данные, полученные в различное время автором, и кривая 5 — данные В. Л. Грановского (7). Расчетные кривые даются жирной линией, причем в пределах применимости расчетов эта линия сплошная, а за этими пределами — пунктирная. Расхождения, появляющиеся при больших $a \cdot p_0$, как раз совпадают по своему характеру с тем, что можно ожидать, учитывая соударения положительных ионов с атомами ртутного пара, при движении ионов к стенкам. Удовлетворительное совпадение опытных данных с расчетом показывает, что основные свойства разряда низкого давления могут быть в настоящее время получены расчетным путем.

Всесоюзный электротехнический институт
Москва

Поступило
29 I 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ J. Langmuir a. L. Tonks, Phys. Rev., **34**, 876 (1929). ² В. Фабрикант, ДАН, XV, № 8 (1937); ЖЭТФ, **8**, 549 (1938). ³ Б. Клярфельд, ДАН, XXV, № 8 (1939); Techn. Phys. of the USSR, **5**, 913 (1938). ⁴ Б. Клярфельд и И. Полетаев, ДАН, XXIII, № 5, 459 (1939). ⁵ W. Nottingham, Phys. Rev., **55**, 203 (1939); Б. Клярфельд, ДАН, XXIV, № 3, 250 (1939). ⁶ T. Killian, Phys. Rev., **35**, 1238 (1930). ⁷ В. Грановский, Известия Ак. Наук СССР, серия физ., № 4, 419 (1938).