

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

В. Л. ГРАНОВСКИЙ

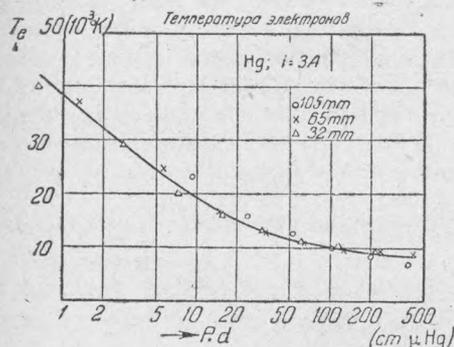
**О ПРИМЕНИМОСТИ ЗАКОНОВ ПОДОБИЯ К ПОЛОЖИТЕЛЬНОМУ
СТОЛБУ РТУТНОГО РАЗРЯДА***(Представлено академиком С. И. Вавиловым 2 V 1940)*

Наиболее широкая форма законов подобия для электрического тока в газах была дана Хольмом⁽¹⁾. Согласно Хольму, два разряда являются подобными, если в соответственных точках обоих разрядов носители тока имеют равные скорости. Если линейные размеры обоих разрядов относятся, как $a : 1$, то разности потенциалов между соответственными точками, сила тока, температура и число электронов на 1 см длины столба и все безразмерные величины одинаковы для обоих разрядов; давление газа, напряженность поля, частота ионизации электронами относятся, как $1 : a$; плотность пространственного заряда, концентрация электронов и ионов, плотность направленного и хаотического токов относятся, как $1 : a^2$; все длины (например длина свободного пробега) и все времена (например средняя продолжительность жизни иона) относятся, как $a : 1$.

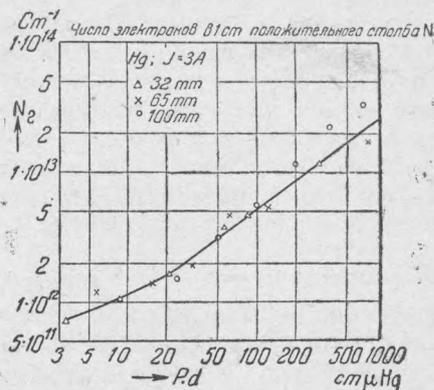
В этой общей форме законы подобия для плазмы разряда не подвергались проверке. Мы поставили себе задачей проверить их применимость к плазме разряда в парах ртути. Для этой цели были использованы систематические данные о положительном столбе ртутного разряда низкого давления при различных диаметрах: 65, 105 мм, отчасти 32 мм, собранные автором путем зондовых измерений по методу Лэнгмюра и Мотт-Смиса, а также для малых диаметров (20 и 32 мм)—данные, опубликованные в работах Б. Н. Клярфельда⁽²⁾. Измерения производились в трубках уже описанной конструкции⁽³⁾, позволяющей получить однородный положительный столб с регулируемыми условиями разряда. Плоские зонды с охранными кольцами помещались у стенок трубки; цилиндрические—по оси трубки. Расстояние между цилиндрическими зондами для измерения градиента потенциала было не менее 20 см; такого же порядка расстояние от них до анода и до сгиба трубки.

Чтобы проверить применимость законов подобия к различным параметрам разряда, надо их сопоставить для трубок разных диаметров при соответственных условиях, т. е. равных силах тока и равных $p \cdot d$. Ниже приведены результаты сравнения для трех величин. На фиг. 1 представлена температура электронов как функция $p \cdot d$ при трех разных диаметрах: 32, 65 и 105 мм. Мы видим, что в пределах случайных ошибок опыта [точность определения T_e по Зеелигеру⁽⁴⁾—порядка 10%] все значения T_e ложатся на общую кривую. Следовательно, в подобных разрядах T_e имеет одинаковые значения в согласии с законом подобия.

На фиг. 2 представлено число электронов в 1 см положительного столба N_e как функция $p \cdot d$ также для трех разных диаметров. Мы замечаем, что в большей части области исследованных давлений точки ложатся приблизительно на общую кривую. Следовательно, здесь закон подобия



Фиг. 1.



Фиг. 2.

также оправдывается: в подобных разрядах одно и то же. Можно написать

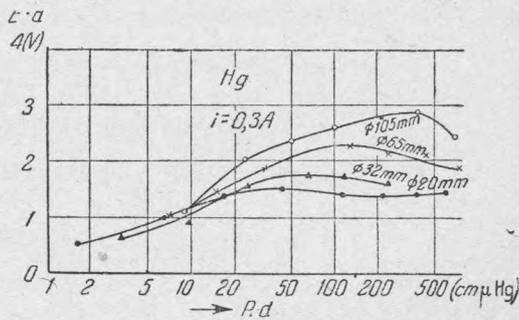
$$N_e = 2\pi \int_0^{\frac{d}{2}} n(r) r dr = nd^2 s(\mu), \text{ где } n_0 \text{ — концентрация по оси трубки, } \mu \text{ —}$$

первое собственное значение (Eigenwert) уравнения $D_a \Delta n - zn = 0$ при специфических для плазмы краевых условиях (⁵, ⁶), s — функция, зависящая от характера ионизации в плазме (⁶). При соответственных условиях ($p \cdot d = \text{const}$ или $\bar{\lambda}d = \text{const}$) μ не зависит от диаметра. Поэтому из постоянства N_e следует, что в подобных разрядах n_0 обратно пропорционально d^2 , в соответствии с законами подобия.

Выше $p \cdot d = 100$ см μHg намечается систематическое расхождение: для $d = 10,5$ см точки ложатся выше, чем для $d = 6,5$ см.

Зависимость продольного градиента потенциала от $p \cdot d$ при $i = 0,3A$ представлена на фиг. 3. Так как, по закону подобия, E в подобных разрядах обратно пропорционально d , то по оси ординат отложено $E \cdot d$. Ниже $p \cdot d = 20$ см μHg можно говорить о совпадении кривых для всех диаметров; здесь закон подобия соблюдается. Дальше начинается систематическое расхождение; «приведенный» градиент тем выше, чем больше диаметр. Если использовать данные Элленбааса(⁷) для $t = 100^\circ$, то они закономерно укладываются в график фиг. 3. Как общий результат можно констатировать, что для положительного столба в парах Hg законы подобия в целом соблюдаются только для низких давлений ($p \cdot d \leq 20$ см μ). Далее начинаются отступления, возрастающие с повышением давления.

Истолкование этих отступлений не встречает больших трудностей. Как показал М. Штеенбек (⁸), применимость законов подобия связана



Фиг. 3.

с характером элементарных процессов, происходящих в разряде. Одни процессы (прямая ионизация ударами электронов, удаление ионов полем, диффузия, образование отрицательных ионов) совместимы с законами подобия; другие (ступенчатая ионизация, рекомбинация в объеме, упругие потери) нарушают подобие. В первую очередь естественно остановиться на ступенчатой ионизации. По данным Клярфельда⁽⁹⁾, последняя играет преобладающую роль при тех давлениях, где мы констатируем отступление от законов подобия. Однако, заметим, что ступенчатая ионизация метастабильных атомов не всегда должна нарушать подобие разрядов. При высоком давлении и большой силе тока продолжительность жизни метастабильного атома определяется не временем его диффузии к стенкам, а ударами 2-го рода, как было показано Фабрикантом⁽¹⁰⁾. В этом случае концентрация метастабильных атомов приближается к равновесной, определяемой по формуле

Больцмана: $n_a = n \cdot \frac{g_a}{g} e^{-\frac{U_a}{kT_e}}$ (U_a — потенциал возбуждения, n и n_a — концентрации нормальных и возбужденных атомов, g и g_a — их статистические веса). В подобных разрядах n_a пропорционально n , поскольку $T_e = \text{const}$. Следовательно, ионизация их преобразуется так же, как ионизация нормальных атомов (т. е. как $\frac{1}{a^3}$), и законы подобия не нарушаются. Опасными с точки зрения подобия являются те условия, где в разрушении возбужденных атомов наряду с ударами 2-го рода играет роль их уничтожение на стенках. Численная оценка показывает, что в исследованных нами условиях установление равновесной концентрации на уровнях 6^3P еще не могло иметь места. Поэтому нарушение законов подобия может происходить именно вследствие ступенчатой ионизации.

Наблюдаемые нами большие отступления от законов подобия при большей силе тока также согласуются с этим объяснением.

Поступило
5 V 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ R. N o l m, Phys. Zeitschr., 15, 289 (1914); 25, 497 (1924). ² Б. Н. К л я р ф е л ь д, ЖТФ, 8, 410 и 2012 (1938). ³ В. Л. Г р а н о в с к и й, Изв. Ак. Наук, сер. физ., № 4, 449 (1939). ⁴ R. S e e l i g e r u. R. H i r c h e r t, Ann. d. Physik, 11, 817 (1931). ⁵ W. F u n k u. R. S e e l i g e r, ZS. f. Physik, 110, 145 (1938). ⁶ В. Л. Г р а н о в с к и й, ДАН, XXIII, 880 (1939). ⁷ V. E l l e n b a a s, ZS. f. Physik, 78, 603 (1932). ⁸ M. S t e e n b e c k, Wiss. Ver. Siemens, 11, 36 (1932). ⁹ Б. Н. К л я р ф е л ь д, ДАН, XXIV, 250 (1939). ¹⁰ В. А. Ф а б р и к а н т, ЖЭТФ, 8, 549 (1938).