

S. C. Brown : El. process / 1961

... ..
ласти тлеющего разряда.

2. КРУКОВО ТЕМНОЕ ПРОСТРАНСТВО И КАТОДНОЕ ПАДЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА

Катодному темному пространству в трубке соответствует состояние, которое проходят электроны прежде, чем они производят возбуждение и ионизацию. Падение потенциала в этом пространстве называется катодным падением. Существуют два типа тлеющих разрядов — «нормальный» и «аномальный». В нормальном тлеющем разряде катод не полностью покрывается свечением, и когда ток в трубке повышается, плотность тока на катоде падает, а напряжение остается постоянным. Таким образом, площадь разряда растет с ростом тока. При аномальном разряде катод полностью покрыт свечением. Поэтому ни ток, ни плотность тока не остаются постоянными с изменением приложенного напряжения.

Тлеющий разряд поддерживается электронами, которые эмитируются при бомбардировке катода положительными ионами. Если n_0 — число электронов, выходящих с катода, n — число электронов, достигающих плазмы в конце области катодного падения, то $(n-n_0)$ — число образованных ионов и $n_0 = \gamma(n-n_0)$. Таким образом, $n/n_0 = (1+\gamma)^d = \exp \int_0^d \alpha dx$.

276

Катодное падение удовлетворяет соотношению

$$\exp \int_0^d \alpha dx = 1 + 1/\gamma,$$

где d — толщина крукова темного пространства. Поэтому следует ожидать, что катодное падение является функцией как рода газа, так и материала катода. Были проведены обширные исследования этого явления. Результаты этих опытов приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1

Нормальное катодное падение в вольтах

| Катод | Воз- дух | Ar | Ne | H ₂ | Hg | Ne | N ₂ | O ₂ | CO | CO ₂ | Cl |
|-------|-------------|-----|-----|----------------|-----|-----|----------------|----------------|-----|-----------------|-----|
| Al | 229 | 100 | 140 | 170 | 245 | 120 | 180 | 311 | — | — | — |
| Ag | 280 | 130 | 162 | 216 | 318 | 150 | 233 | — | — | — | — |
| Au | 285 | 130 | 165 | 247 | — | 158 | 233 | — | — | — | — |
| Ba | — | 93 | 86 | — | — | — | 157 | — | — | — | — |
| Bi | 272 | 136 | 137 | 240 | 475 | — | 210 | — | 525 | — | — |
| C | — | — | — | 240 | — | — | — | — | — | — | — |
| Ca | — | 93 | 86 | — | — | 86 | 157 | — | — | — | — |
| Cd | 266 | 119 | 167 | 200 | — | 160 | 213 | — | — | — | — |
| Co | 380 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Cu | 370 | 130 | 177 | 214 | 447 | 220 | 208 | — | 484 | 460 | — |
| Fe | 269 | 165 | 150 | 250 | 298 | 150 | 215 | 290 | — | — | — |
| Hg | — | — | 142 | — | 340 | — | 226 | — | — | — | — |
| Ir | 380 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| K | 180 | 64 | 59 | 94 | — | 68 | 170 | — | 484 | 460 | — |
| Mo | — | — | — | — | 353 | 115 | — | — | — | — | — |
| Mg | 224 | 119 | 125 | 153 | — | 94 | 188 | 310 | — | — | — |
| Na | 200 | — | 80 | 185 | — | 75 | 178 | — | — | — | — |
| Ni | 226 | 131 | 158 | 211 | 275 | 140 | 197 | — | — | — | — |
| Pb | 207 | 124 | 177 | 223 | — | 172 | 210 | — | — | — | — |
| Pd | 421 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Pt | 277 | 131 | 165 | 276 | 340 | 152 | 216 | 364 | 490 | 475 | 275 |
| Sb | 269 | 136 | — | 252 | — | — | 225 | — | — | — | — |
| Sn | 266 | 124 | — | 226 | — | — | 216 | — | — | — | — |
| Sr | — | 93 | 86 | — | — | — | 157 | — | — | — | — |
| Th | — | — | — | — | — | 125 | — | — | — | — | — |
| W | — | — | — | — | — | 125 | — | — | — | — | — |
| Zn | 277 | 119 | 143 | 184 | — | — | 216 | 354 | 480 | 410 | — |

Поскольку толщина d крукова темного пространства зависит от условий соударения электронов, то произведение d на давление P должно было бы быть величиной постоянной, если нет никаких осложняющих факторов. Оказалось, что соотношение $dr = \text{const}$ в первом приближении выполняется, причем величина константы зависит от рода газа и не зависит от материала катода. Результаты изучения этого соотношения приведены в табл. 14.2.

277

Толщина области катодного падения ($d_{кр}$ в см. мм рт. ст. при комнатной температуре)

| Катод | Воздух | Ar | H ₂ | He | Hg | N ₂ | Ne | O ₂ |
|-------|--------|------|----------------|------|------|----------------|------|----------------|
| Al | 0,25 | 0,29 | 0,72 | 1,32 | 0,33 | 0,31 | 0,64 | 0,24 |
| C | — | — | 0,9 | — | 0,69 | — | — | — |
| Cd | — | — | 0,87 | — | — | — | — | — |
| Cu | 0,23 | — | 0,8 | — | 0,6 | — | — | — |
| Fe | 0,52 | 0,33 | 0,9 | 1,30 | 0,34 | 0,42 | 0,72 | 0,31 |
| Mg | — | — | 0,61 | 1,45 | — | 0,35 | — | 0,25 |
| Hg | — | — | 0,9 | — | — | — | — | — |
| Ni | — | — | 0,9 | — | 0,4 | — | — | — |
| Pb | — | — | 0,84 | — | — | — | — | — |
| Pt | — | — | 1,0 | — | — | — | — | — |
| Zn | — | — | 0,8 | — | — | — | — | — |

Многие исследователи [2] измеряли величину поля в кругсовом темном пространстве как функцию расстояния от катода. Они обнаружили, что поле линейно зависит от расстояния и что можно

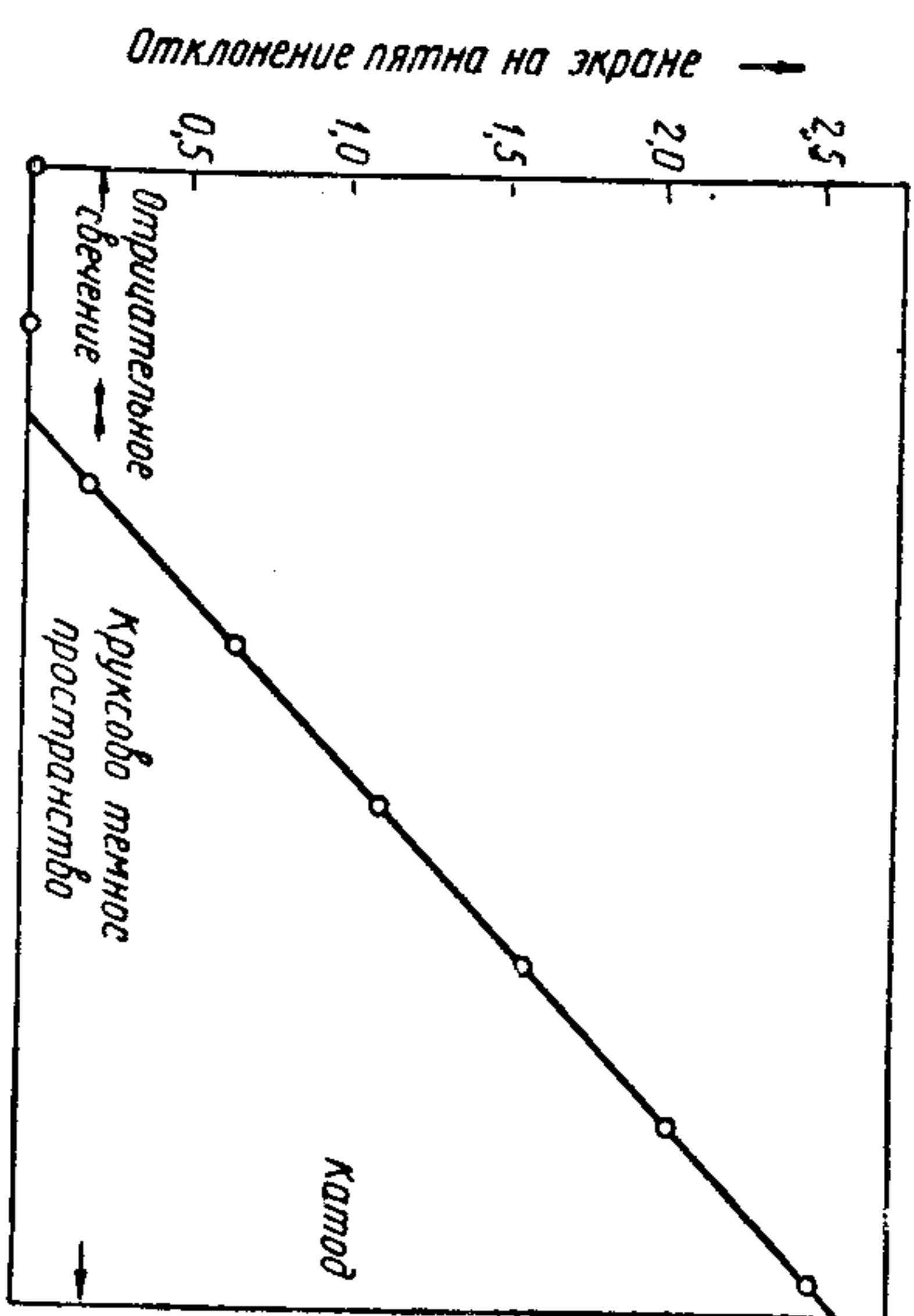


Рис. 14.4. Экспериментальное определение электрического поля в кругсовом темном пространстве.

написать $E = K(d-x)$, где K — константа. Типичная экспериментальная кривая показана на рис. 14.4. При $x=d$ распределение потенциала имеет вид

$$V_x = \int_0^x E dx = K \int_0^x (d-x) dx = K \left(xd - \frac{x^2}{2} \right).$$

Из граничного условия $V_x = V_c$, где V_c — катодное падение потенциала, получим

$$K = \frac{2V_c}{d^2}; \quad (14.5)$$

$$V_x = \frac{V_c x (2d-x)}{d^2}; \quad (14.6)$$

$$E_x = \frac{dV_x}{dx} = \frac{2V_c (d-x)}{d^2}. \quad (14.7)$$

Согласно уравнению Пуассона (в абсолютной системе единиц)

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{2V_c}{d^2} = -4\pi\rho.$$

Отсюда видно, что плотность тока постоянна и равна $V_c/2\pi d^2$.

Предположим, что все электроны, входящие в кругсовое темное пространство, образуются в результате бомбардировки катода положительными ионами. Тогда для плотности тока имеем

$$j_0 = \gamma i_{0+}. \quad (14.8)$$

Индексы «плюс» и «минус» относятся к положительным ионам и электронам. Плотность тока на катоде равна

$$j_0 = i_{0+} (1 + \gamma). \quad (14.9)$$

Так как плотность тока положительных ионов равна $i_{0+} = \rho_{0+} v_{0+}$, где $v_{0+} = \mu_+ E_0$, E_0 — поле у катода, то мы можем написать

$$j_0 = \rho_{0+} v_{0+} (1 + \gamma).$$

Положив в уравнении для E_x $x=0$, имеем

$$E_0 = \frac{2V_c}{d}, \quad (14.10)$$

и из уравнения Пуассона

$$\rho_{0+} = \frac{E_0}{4\pi d} \quad (14.11)$$

мы получим следующее выражение для плотности тока в функции от катодного падения:

$$j_0 = \frac{V_c^2 \mu_+ (1 + \gamma)}{\pi d^3}. \quad (14.12)$$

Катодное падение можно вычислить, предположив, что выполняются условия самоподдерживающегося разряда:

$$\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = \int_0^d \alpha dx. \quad (14.13)$$

§ 5

Таблица 29

Кривые зависимости V_n от расстояния [19, 188]

| V_n | H | Ne | Ar | He | Ne | Ar | Hg | Другие газы |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|-------------|
| 177 | 220 | 130 | 241 | 908 | 575 | 450 | CO — 484 CO ₂ — 460 O ₂ — 354 | |
| 143 | — | 119 | 81 | 216 | 280 | — | CO — 480 | |
| 143 | 140 | 120 | 100 | 115 | 180 | 230 | Cl ₂ — 280 O ₂ — 310 | |
| — | — | — | — | 281 | 421 | 475 | CO — 525 | |
| 150 | 150 | 155 | 920 | 215 | 270 | 305 | O ₂ — 290 Xe — 306 K — 80 Os — 340 | |
| 160 | 140 | 130 | 275 | 901 | 225 | 275 | O ₂ — 364 Cl ₂ — 275 | |
| 165 | 152 | 130 | 276 | 416 | 277 | — | Cl ₂ — 275 K — 80 | |
| 60 | 68 | 66 | — | 179 | 580 | 310 | — | |
| — | — | — | — | 200 | — | — | — | |

(8,29) можно оконтать усложнением I_n при распадении I_n^+ для V_n — зависимости в газе U и температурной зависимости физической

Таблица 27

Правильная зависимость I_n от V_n для разных газов

| Газ | He | Ne | Ar | He | Ne | Ar | Вакуум | Hg | Другие газы |
|--------|----|----|-----|-----|-----|-----|--------|----|-------------|
| Cu | — | — | — | 64 | — | — | 270 | 15 | — |
| Au | — | — | — | 110 | — | — | 570 | — | — |
| Mg | 3 | 5 | 20 | 60 | — | — | 330 | 1 | Kr — 45 |
| Al | — | 0 | 160 | 72 | — | 400 | — | 8 | Xe — 16 |
| Fe, Ni | 2 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Pt | 5 | 18 | 150 | 60 | 880 | — | 550 | — | — |
| Стекло | — | — | — | 80 | — | — | ~ 10 | — | — |

каждо-либо определенное катоды V_n имеет больше 500 в. Для для Al в парах Hg неточны из-за сильного химического взаимодействия между катодом и газом; то же самое относится к O₂, Cl₂ и ряду других. Выяснение (8,3) показывает, грубо говоря, что V_n является произведением двух функций: средней энергии ионизации в газе U и коэффициента вторичной эмиссии на поверхности катода γ . Этот объясняется тот факт, что V_n для системы Cu—He больше, чем для K—H₂. Материалом для катода может служить и нагретое выше 300°C стекло; значения V_n для мытого стекла в H₂ и воздухе выше 300°C чены в табл. 26. Нормальная плотность тока I_n (табл. 27) оказывается малой в инертных газах (за исключением Ar) и Hg и большой в молекулярных газах (за исключением Ar) и смеси от материала катода.

Данные эти не особенно точны, главным образом из-за загрязнений поверхности и ее неоднородностей. Согласно (8,5) и

A. Engel: Ioniz. Physik, Moskva 1959

причиной колебаний при нормальном токе является, вероятно, разнородная катодовая засоренность поля, возникающая на различных краях под действием см. выплв.

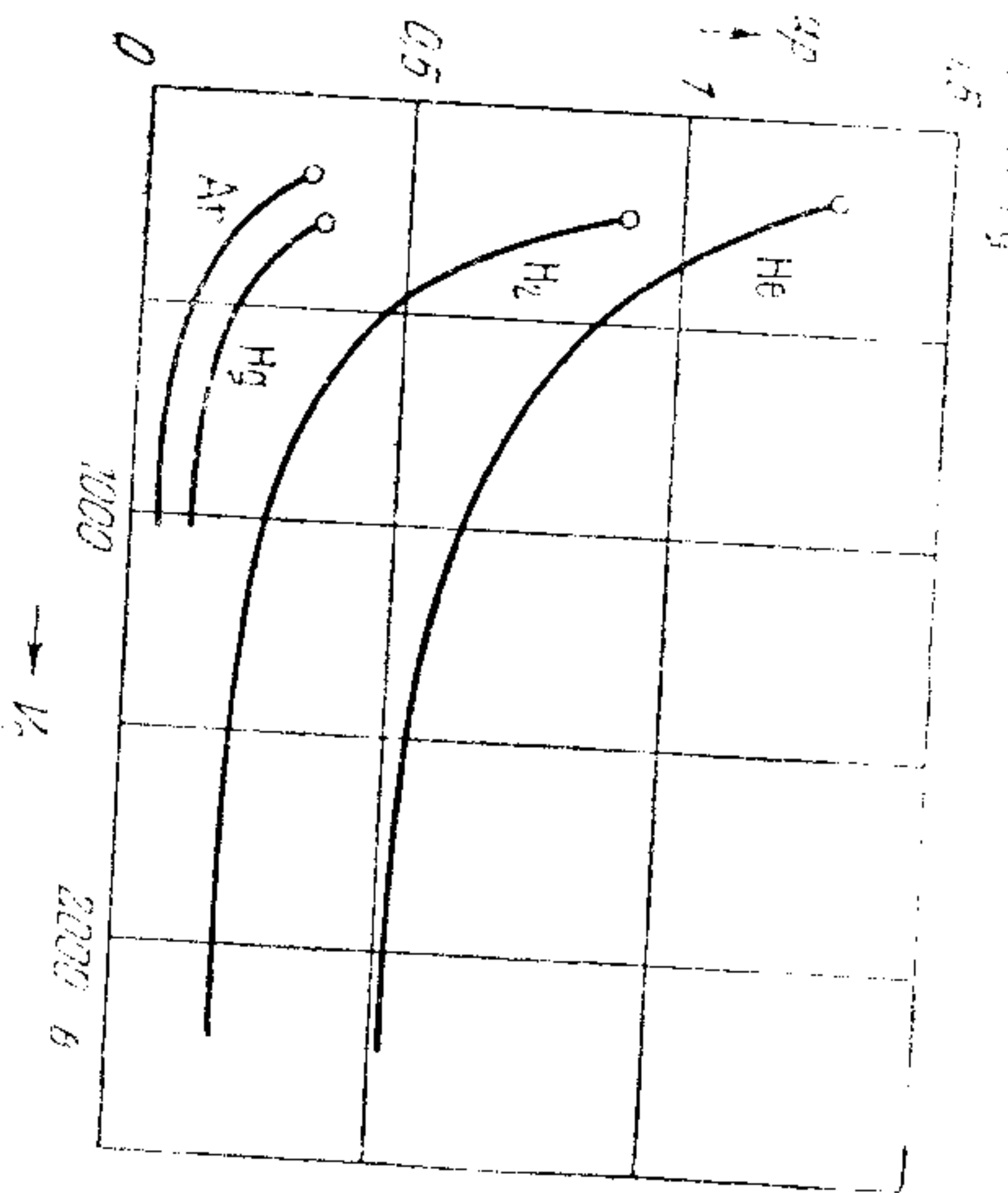


Рис. 17. Зависимость напряжения катодного падения U_c от плотности тока j_c для различных газов при нормальном токе и различных расстояниях d_p и d_{np} от катода и анода (табл. 28).

Нормальная ширина катодного пространства d_n (табл. 28), как это следует из формул (8.4) и (8.27), возрастает при увеличении интенсивности поля в газе и коэффициенте при вторичной эмиссии. Так, например, Ar и Ne имеют большой коэффициент ионизации и, следовательно, малое d_n ; He — наоборот. Зависимость d_n от материала катода менее выражена.

Нормальная ширина катодного пространства d_{np} в см для He [19, 188]

| Газ | He | Ne | Ar | Ne | Ar | He | Ar | He | Ar | He | Ar |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ca | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 | 1.45 |
| Al | 1.32 | 1.61 | 0.71 | 0.72 | 0.31 | 0.25 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 |
| Fe | 1.3 | 0.72 | 0.61 | 0.9 | 0.42 | 0.5 | 0.61 | 0.61 | 0.61 | 0.61 | 0.61 |
| Стекло | | | | | | 0.8 | | 0.3 | | | |

Уменьшение катодного падения U_c в зависимости от плотности тока j_c и пропускания d_p от величины катодного падения U_c для различных газов и расстояния катодного пространства показано на рис. 115 и 117. Из них видно, что, когда U_c возрастает примерно на порядок величины, j_c меняется на один порядок. При возрастании U_c катодное пространство

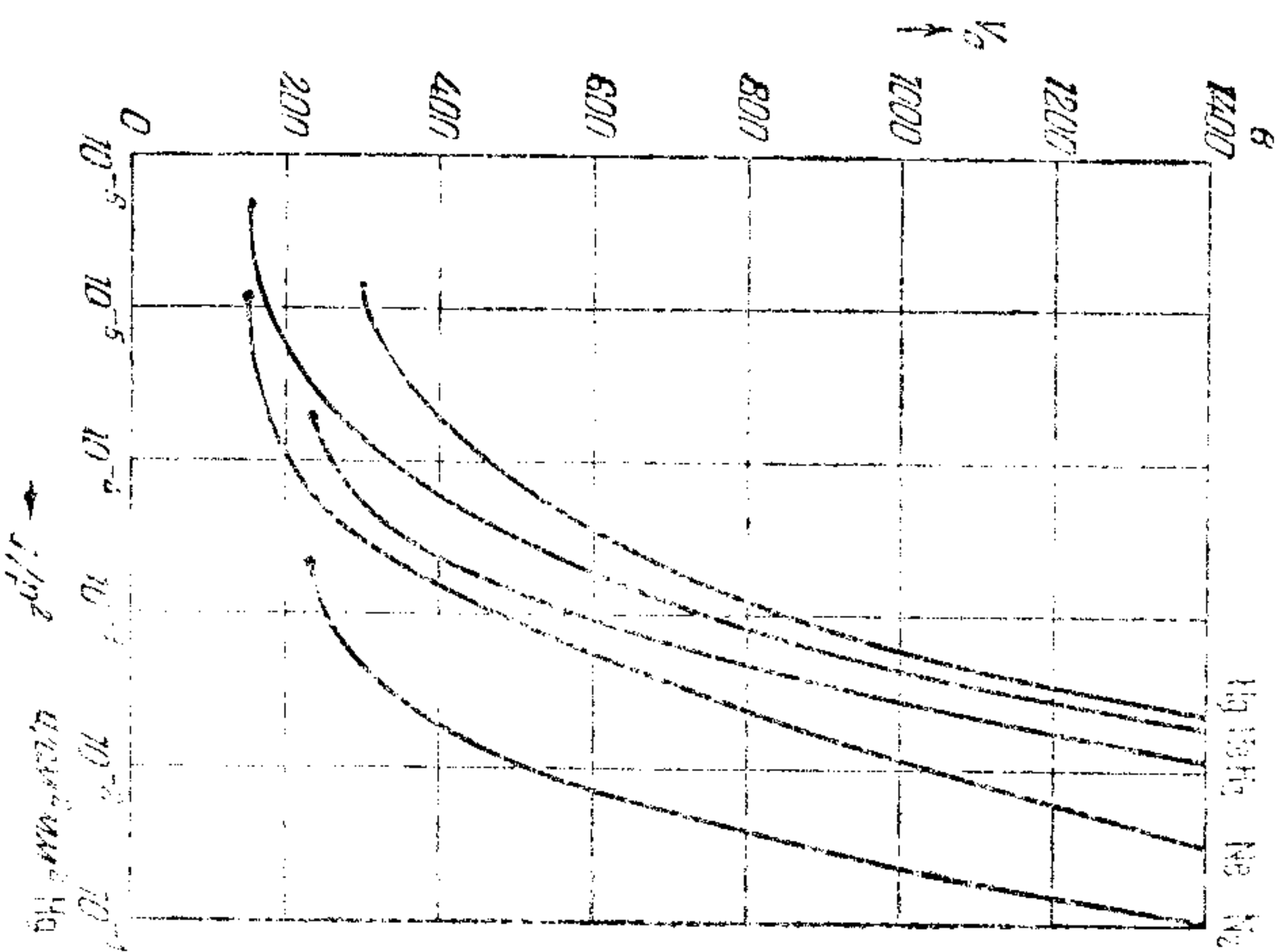


Рис. 115. Зависимость анодного катодного падения U_c от плотности тока j_c для различных газов при нормальном токе и различных расстояниях d_p и d_{np} от катода и анода (табл. 28).

сужается примерно на одну четверть своей первоначальной ширины и при дальнейшем возрастании U_c область незначительного изменения плотности тока на катоде элементарно разряда обычно увеличивается в несколько раз.

2. Измерение напряженности катодного падения. Для определения плотности тока на катоде элементарно разряда обычно пользуются визуальным или фотометрическим измерением плотности тока на катоде, покрытой отрицательным светочувствительным катодным слоем, если оно существует. При этом преобладающим фактором является явление ослепления при приближении к лучам света