

О ЗАКОНАХ ПОДОБИЯ КАТОДНЫХ СЛОЕВ НОРМАЛЬНЫХ ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДОВ ПРИ СРЕДНИХ ДАВЛЕНИЯХ

Н. Н. Соболев

Установлено, что для катодных слоев нормального тлеющего разряда в газах при средних давлениях применимо частичное пуассоновское подобие. Сравнение теории и эксперимента показывает, что для разряда в воздухе инвариантность плотности тока справедлива до давлений ~ 100 торр, для водорода нарушение инвариантности наступает раньше.

Два разряда называются подобными /1—3/, если при линейном преобразовании пространства и времени в соответствующих точках $\mathbf{r} = s\mathbf{r}'$, $t' = st$ физические величины преобразуются также линейно: $G(\mathbf{r}', t) = s^{\alpha[G]} G(\mathbf{r}, t)$. Разряд описывается кинетическими уравнениями Больцмана и уравнениями Максвелла. При преобразовании подобия эти уравнения должны оставаться инвариантными. Это требование и позволяет определить показатели преобразования $\alpha[G]$ различных величин, характеризующих разряд.

Для катодных слоев нормальных тлеющих разрядов с малой степенью ионизации и постоянным химическим составом справедливо пуассоновское подобие (П-подобие) /1—3/:

$$\alpha[E] = \alpha[n_n] = -1, \quad (1)$$

$$\alpha[n_e] = \alpha[n_i] = \alpha[\rho] = \alpha[j] = -2, \quad (2)$$

где E — напряженность электрического поля, n_n — концентрация нейтралов; n_e и n_i — концентрации электронов и ионов; ρ — удельная проводимость; j — плотность тока. Так как нагрев мал, то температура нейтралов T_n равна температуре окружающей среды. Отсюда следуют инварианты подобия ρd_n , j_n/ρ^2 и V_n . Эти выводы вытекают не только из теоретических соображений, но и подтверждаются большим количеством экспериментальных исследований. Нормальные значения катодного падения потенциала V_n , значения ρd_n и j_n/ρ^2 приведены во многих монографиях (см., напр., /4/).

Нормальный стационарный тлеющий разряд постоянного тока может существовать не только при низких давлениях, но и при средних вплоть до атмосферного, причем разряд может быть реализован как с катодом, охлаждаемым водой /5/, так и с катодом без охлаждения /6/. В то время

как температура газа катодных слоев при малых давлениях остается практически равной температуре окружающей среды, при повышенных давлениях воздуха даже при охлаждении водой медного катода средняя температура газа в катодном слое растет. При средних давлениях она может достигать 500 — 700 К, а при атмосферном давлении до 1000 К. Плотность газа при этом падает /5/.

Оказывается, что для нормальных тлеющих разрядов средних давлений с малой степенью ионизации применимы законы П-подобия, правда не полного, а только частичного, так как температуры для ионов и нейтралов, а, следовательно, и их кинетические уравнения, не инвариантны.

Покажем справедливость сформулированного утверждения. Если рассмотреть только кинетическое уравнение электронов в слабоионизованном газе, то оно (как и функция распределения электронов) останется инвариантным при линейном преобразовании подобия даже при нагреве газа до 1000 К. Это связано с тем, что хаотические скорости движения нейтралов малы по сравнению с электронными на порядок или два, и в интеграле столкновения I_{en} электронов и нейтралов последние можно рассматривать как неподвижные даже при повышенных температурах газа. Следовательно, I_{en} остается почти неизменным при нагреве газа, и кинетическое уравнение для электронов инвариантно, откуда следует, что и при повышенных температурах показатели подобия $\alpha[E]$, $\alpha[V]$ и $\alpha[n]$ равны -1 . Показатели подобия $\alpha[\rho] = \alpha[j_e] = \alpha[n_i] = \alpha[n_e] = -2$ следуют из уравнений Максвелла. Это не противоречит кинетическим уравнениям при малой степени ионизации (менее 10^{-5}), когда $I_{ee}, I_{ii}, I_{ie} \ll I_{en}, I_{in}$.

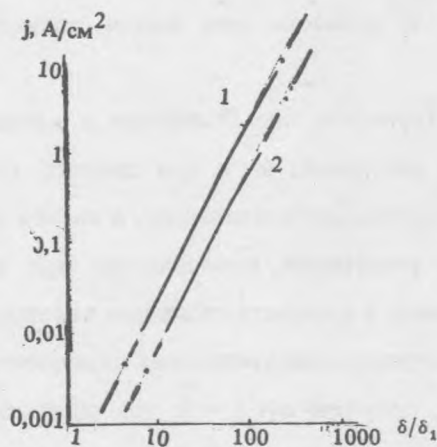


Рис. 1. Зависимость плотности тока от приведенной плотности воздуха (1) и водорода (2) δ/δ_1 . Сплошной линией обозначен расчет в предположении инвариантности j/n^2 , штрих-пунктиром — результаты эксперимента; δ_1 — плотность газа при давлении 1 торр и 12 °С /4/.

Как указывалось ранее, при высоких давлениях температура газа катодного слоя повышается по сравнению с температурой окружающей среды, но остается значительно ниже температуры электронов. Поэтому при проверке законов подобия необходимо иметь в виду, что в катодном слое при средних давлениях инвариантами будут $n_n d_n$ и j_n/n_n^2 , но не ρd_n и j_n/ρ^2 .

Инвариантность j_n/n_n^2 в катодных слоях при высоких давлениях согласуется с экспериментами /5/, результаты которых для разрядов в воздухе и азоте в логарифмическом масштабе представлены на рис. 1. Экспериментальные кривые — сплошные, расчетные кривые (исходя из закона подобия j/n_n^2) — штрих-пунктирные. По оси абсцисс отложены относительные значения плотности δ/δ_1 , где δ_1 — плотность газа при давлении 1 торр и температуре 12 °С.

Как видно из рисунка, вплоть до относительных значений плотности $\delta/\delta_1 = 100$ для воздуха имеет место хорошее согласие теории и эксперимента, для H_2 отклонение наступает раньше. Отклонение от закона подобия j/n_n^2 связано с тем, что при толщинах слоя менее 10^{-3} см и при больших значениях n_n , E достигает таких больших значений (до 10^5 В/см), что плотность тока j уже пропорциональна не напряженности поля E , а величине $(E/n_n)^{1/2}$.

Согласно (1), падение потенциала $V = \alpha[r] \cdot \alpha[E]$ является инвариантом. Это согласуется с экспериментом /6/, где с помощью измерений разности потенциалов между подвижными электродами (правда, неохлажденными) установлено, что V_n при атмосферном давлении близко к падению потенциала, полученному при низких давлениях. Отметим, что инвариантность $n_n d_n$ и ρ/n_n^2 при давлениях близких к атмосферному экспериментально проверить нельзя, ввиду того, что толщина катодного слоя при атмосферном давлении оказывается меньше 10^{-3} см. Судить об инвариантности $n_n d_n$ и ρ/n_n^2 в катодном слое можно только на основании изложенных выше соображений.

Подводя итог, можно утверждать, что П-подобие в катодном слое тлеющего разряда имеет место не только при малых давлениях, но и при средних, близких к атмосферному. При этом нужно иметь в виду, что П-подобие будет неполным, а только частичным, так как, несмотря на то, что функции распределения электронов инвариантны при преобразовании подобия, функции распределения нейтралов и ионов в катодных слоях при высоком давлении неинвариантны.

Так как подвижность электронов при умеренных электрических полях $b_e \propto 1/n$, то $\alpha[b_e] = 1$. С учетом того, что $\alpha[E] = -1$, получим $\alpha[v_d] = 0$, т.е. скорость дрейфа электронов v_d в подобных катодных слоях постоянна. Следовательно $\alpha[j_e] = \alpha[n_e]$, что согласуется с /4/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pfau S., Rutcher A., Wojaszek R. Beitr. Plasma Phys., **9**, 333 (1969).
2. Рухадзе А. А., Соболев Н. Н., Соколов В. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 2, 37 (1991).
3. Рухадзе А. А., Соболев Н. Н., Соколов В. В. УФН, **161**, 195 (1991).
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М., Наука, 1987.
5. Engel Von A. V., Seeliger R., Steenbeck M. Zeit. Physik, **85**, 144 (1933).
6. Gambling W. A., Edels H. Brit. J. Appl. Phys., **5**, 36 (1954).

Поступила в редакцию 20 января 1992 г.