

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ПРОБОЯ ГАЗА
ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

И. И. КАПРАЛОВ

Введение

Теория Таунсенда-Роговского не дает ответа на многие вопросы, касающиеся особенностей пробоя газа. Установленный экспериментально закон Пашена недостаточно полно определяет количественную сторону сложного процесса, каким является пробой.

По нашему мнению, такое обстоятельство сложилось благодаря тому, что важный параметр разряда—предпусковой ток почти всегда оставался в стороне, вне поля зрения экспериментатора. На рис. 1 изображена типичная кривая допускового анодного тока ионного прибора, имеющего накаливаемый катод. Точка зажигания (пробой) определяется двумя параметрами: пробивным напряжением (напряжением зажигания) и предпусковым током. Наклон этой кривой к оси абсцисс определяет проводимость $\rho(U_a)$. Проводимость газа в условиях низковольтного разряда быстро возрастает не только с напряжением, но и с термоэмиссией катода. Согласно кривой допусковых токов явление пробоя газа подготавливается постепенно, но наступает внезапно, подобно взрыву. Нарастание тока с напряжением приводит спонтанным образом к процессу, имеющему новое качество,—пробоем (зажиганию разряда). Точка зажигания отлична от всех других точек тем, что в этой точке процесс перестает быть обратимым. Таким образом, для того, чтобы получить более полную картину предпускового состояния газа, необходимо учитывать не только особенности протекания разряда, но и регистрировать параметры, показывающие наступление этого лавинообразного процесса. К ним необходимо отнести: предпусковой ток, напряжение зажигания, форму и крутизну допускового тока. Разработанная нами экранированная система электродов с поджигающей нитью и сеткой (рис. 2) может служить хорошей моделью для изучения статического процесса, приводящего к зажиганию газа.

Из рис. 2. видно, что формируемый вдоль нити ионизированный канал (использовано известное свойство распространения разряда вдоль тонких металлических проволок—анодов [1, 2] с самоограничивающейся областью ионизации) выполняет роль искусственного пробивного канала и локализованного плазменного катода. Если к аноду А, экранированному сеткой С,

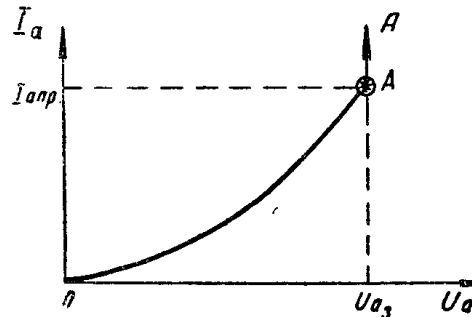


Рис. 1. ОА — кривая допускового тока
[$I_{a\lambda} = f(V_a)$]

* — точка зажигания
 I_{anp} — предпусковой ток
 U_{a3} — напряжение зажигания.

будет приложено напряжение, достаточное для того, чтобы происходила ударная ионизация газа, то анод будет зажигаться всякий раз, когда электрическое поле, провисающее сквозь сеточную диафрагму, будет вытягивать из головки плазменного канала достаточную „запальную дозу“ электронов с того расстояния $d_{пр}$, которое обеспечит оптимальные условия для ионизации. Эти „запальные дозы“ представлялось возможным точно регистрировать в цепи анода, оценивая по величинам предпускового анодного тока и поджигающего тока нити.

В настоящей работе изучались характеристики зажигания в этой модели с целью установления:

а) зависимости поджигающего тока $I_{на}$ от предпускового $I_{апр}$;

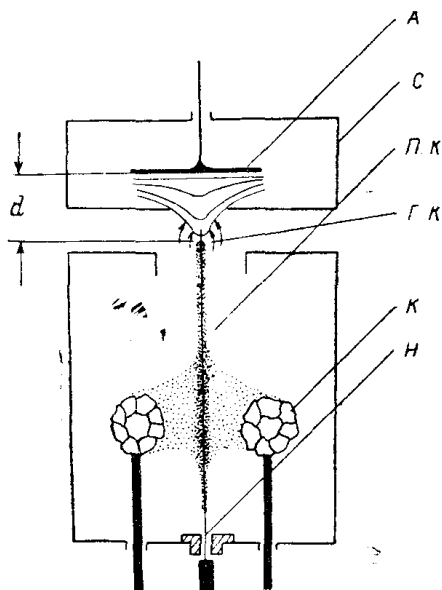


Рис. 2. Схема формирования предпусковой ступени разряда в тиратроне с управляющей нитью. А — анод; С — сетка; К — катод; Н — нить; ПК — плазменный катод с самоограничивающейся областью ионизации; Г. К. — головка плазменного катода; d — пробивное расстояние. Стрелки — пути электронов, вытягиваемых из катода анодным полем.

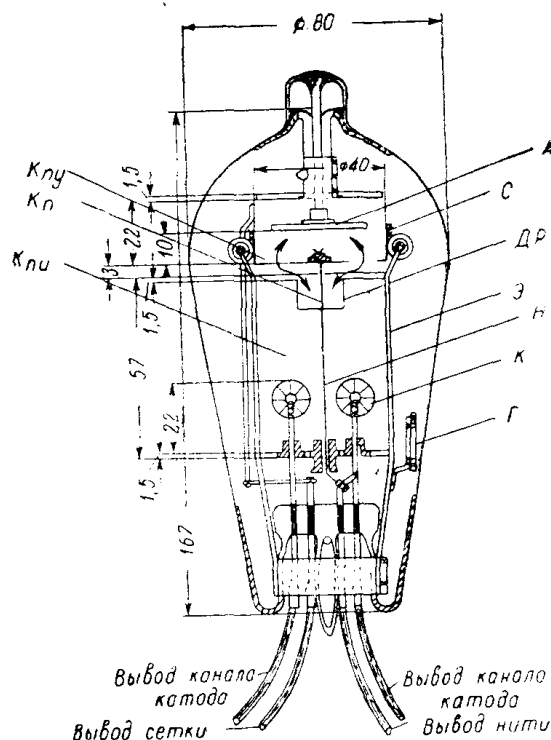


Рис. 3. Опытный трехкамерный тиратрон (упрощенная конструкция).

$K_{ли}$ — камера предварительной ионизации.
 $K_{п}$ — поджигающая камера,
 $K_{пу}$ — пусковая камера, А — анод, К — катод,
С — сетка, Н — нить, Д. Р. — деионизационная решетка, Г — геттер. Стрелками показан путь разряда.

б) основного условия искусственного поджигания.

Решение этих вопросов должно раскрыть картину механизма формирования низковольтной дуги и пополнить наши сведения о работе ионных приборов типа тиратрона работающих с вспомогательным поджиганием.

Постановка эксперимента

Для решения поставленных выше вопросов, характеризующих стадию формирования пробоя и зажигания газа при наличии термоэмиссии, был использован опытный ионный прибор, конструкция которого представлена на рис. 3.

Используя свойства самоограничения вспомогательного разряда и его самодвижения вдоль нити, оказалось возможным поджигать главную дугу, вводя в камеру высокой напряженности электрического поля определенные регистрируемые „запальные дозы“ электронов. Эти „запальные дозы“

формировались в цепи анода за счет электронов плазменного канала нити. Плазменный канал постепенно перемещался к пусковой камере прибора по мере роста тока нити до его поджигающего значения.

Принципиально опытная лампа ничем не отличалась от конструкции рис. 2. Прибор был подвергнут тщательной вакуумной обработке и наполнен парами ртути, а затем устанавливался в схеме рис. 4. Схема была оснащена электроизмерительными приборами класса 0,5. Управляющие цепи прибора питались от батарей типа БАС-70. С целью регулирования

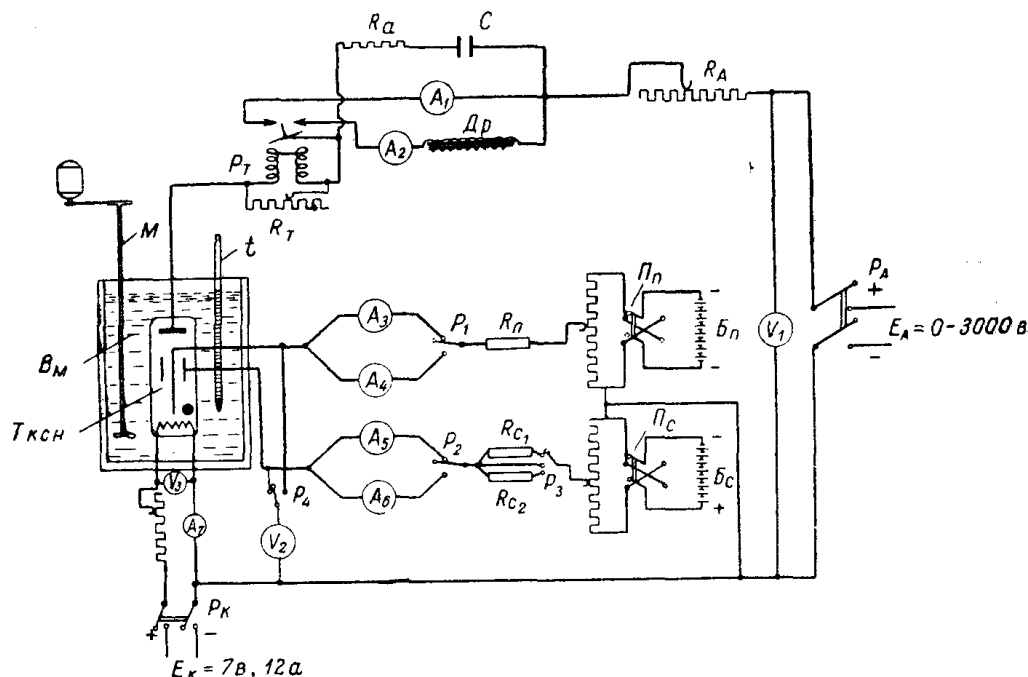


Рис. 4. Электрическая схема для исследования предпускового статического режима камерных тиратронов. Основные данные аппаратуры:

P_1, P_2, P_3, P_4 — однополюсные переключатели; Π_n, Π_c — двухполюсные переключатели; R_A, R_K — двухполюсные рубильники; R_n, R_{c1}, R_{c2} — беспроволочные сопротивления 20, 125, 510 ком; R_A — движковый реостат 2250 ом 0,5 а; R_a — проволочное сопротивление 5 ом. R_T — движковый реостат 1000 ом 0,2 а; P_T — телефонное реле; $дp$ — дроссель 1 гн; C — емкость 10 мкф; B_c, B_n — источники питания цепей сетки и поджигателя; B_M — ванна масляная на 7 литров; M — мешалка с электромотором; t — термометр; T_{KCH} — исследуемый тиратрон; A_1 — амперметр аstaticкий 0 — 2,5 а; A_2, A_4, A_6 — микроамперметры магнитоэлектрические 0 — 100 мка; A_3, A_5 — миллиамперметры магнитоэлектрические 0 — 15 — 3 — 7,5 ма; V_1 — вольтметр магнитоэлектрический, 0 — 1500 — 3000 в; V_2 — ламповый вольтметр постоянного тока 0 — 5 — 10 — 50 — 100 — 500 в; V_3 — вольтметр магнитоэлектрический 0 — 10 а; A_7 — амперметр магнитоэлектрический 0 — 1,5 — 3, 7, 5 — 15 а.

давления паров ртути в приборе он погружался в масляную ванну емкостью 7 литров, подогреваемую электрической печью. Печь погружалась вблизи дна ванны. Мешалка M создавала равномерное распределение температуры масла по всему объему ванны. Давление паров ртути определялось по температуре масла. Температура масла регистрировалась термометром t . Микроамперметр анодной цепи защищался от больших токов с помощью реле P_T . Исследование предпускового режима производилось по методу однократных зажигания прибора. До его зажигания определялись статические предпусковые токи и поджигающий ток нити при соответственных параметрах анодной цепи и постепенных изменениях давления ртутного пара. Остальные данные аппаратуры схемы видны непосредственно из рисунка. Наличие разрядных экранированных камер

определяло особенности прибора. Он был назван нами камерным тиратроном с управляющей сеткой и нитью. В данном эксперименте сетка *C* не использовалась. Она соединялась непосредственно с катодом.

Общая картина подобия характеристик поджигающих и предпусковых токов

Результаты измерений отражены в кривых рис. 5 а, б. На рис. 6 изображены зависимости токов $I_{пз}$ и $I_{анр}$ от давления ртутных паров p при постоянном анодном напряжении зажигания $U_{аз} = 700$ вольт. Они построены по данным рис. 5 а, б и представляют собой тип кривых большего семейства. Аналогичные кривые можно построить для любого значения $U_{аз}$. Они выражают подобие токов $I_{пз}$ и $I_{анр}$ с изменением p . На этом же рисунке построена кривая, показывающая зависимость отношения

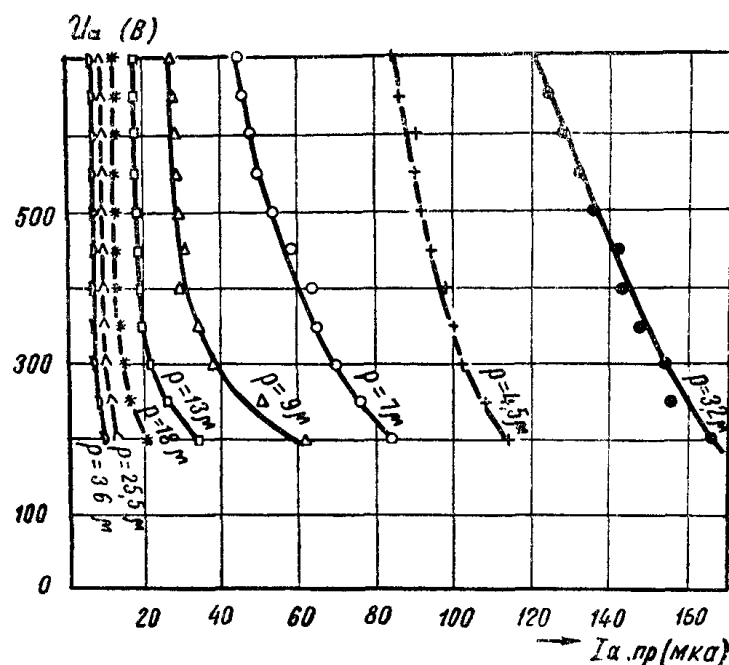


Рис. 5а. Зависимость напряжения зажигания от предпусковых токов $I_{анр}$. Параметр — давление газа p (опытный прибор, рис. 3).

$I_{пз}/I_{анр} = K$ от давления p : она может быть выражена уравнением прямой линии $K - K_0 = \text{tg } \varphi \cdot p$. Коэффициент K_0 получается путем экстраполяции прямой линии при $p = 0$. Он отражает закон токораспределения в цепях анода и нити для заданной конструкции электродов в вакууме. Соответственно этому определению коэффициент K должен отражать этот же закон для предпускового режима. Величина тангенса угла наклона прямой K к оси абсцисс выражает условие зажигания анодной камеры прибора при введении в нее пучка электронов из плазменного канала нити. Это условие зажигания прибора можно выразить следующим образом: чтобы происходило зажигание прибора при различных давлениях необходимо, чтобы отношение разности коэффициентов распределения к давлению было вполне определенной величиной

$$\frac{K - K_0}{p} = \text{tg } \varphi = \text{const при } U_{аз} = \text{const.} \quad (1)$$

Таким образом, для того, чтобы произошел пробой газа и образовалась плазма, необходима определенная доза электронного предпускового тока. Поскольку разряд на нить использовался нами в качестве источника и „транспортера“ электронов из области слабых в область сильных электрических полей, то от концентрации зарядов в рабочей головке канала и от ее уровня подъема по нити будет зависеть величина предпускового тока. Все факторы, которые будут влиять на концентрацию зарядов ка-

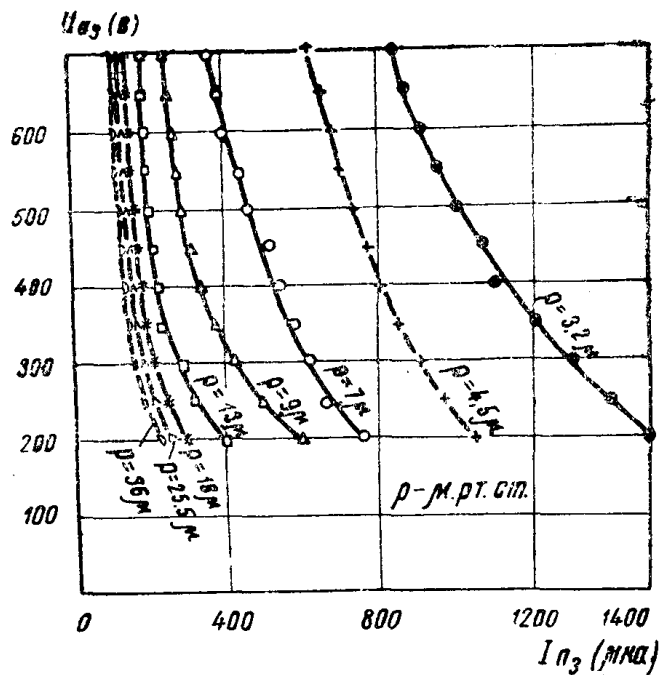


Рис. 56. Влияние изменения давления газа p на ход пусковой характеристики камерного тиратрона (рис. 3).

нала нити и его длину распространения, должны влиять и на предпусковой ток. Поджигающий ток порождает предпусковой. Они поэтому органически связаны и в определенном масштабе копируют друг друга при изменении условий пробоя. Пробивная напряженность анодного поля $E_{пр}$ и давление газа p определяют границы измерения этих токов.

Основное условие поджигания газа

Как уже нами было ранее показано, пробой газа подготавливается постепенно. Работающая в схеме модель ионной трубки дала возможность определить по токам анода и нити критическое состояние газа перед зажиганием анода. Это состояние отражено в кривых вида: $I_{пз} = f_1(p)_{u_{аз}=\text{const}}$ и $I_{анр} = f_2(p)_{u_{аз}=\text{const}}$ (рис. 6).

Каждая точка кривых характеризует условия наступления лавинообразного процесса. Детальная проверка хода кривых (рис. 6) показала, что предпусковой анодный ток с изменением давления газа p при постоянном анодном напряжении изменялся по закону гиперболы (рис. 7). Кривая изменения поджигающего тока от давления близка к гиперболе (рис. 6).

Следовательно, можно написать

$$I_{анр} \cdot p = \text{const}, \quad (2)$$

$$I_{пз} \cdot p = \text{const} (A_p + B), \quad (3)$$

где A и B — постоянные величины. Справедливость этих утверждений показывает зависимость K от p : $K = I_{пз} / I_{анр} = Ap + B$ (прямая линия на рис. 6).

Если учесть, что давление насыщенных паров ртути для измеряемого температурного интервала пропорционально концентрации частиц газа [3], а ток $I_{анр}$ пропорционален концентрации электронов, ионизирующих газ, то выражение предпускового тока перепишется в следующем виде:

$$I_{анр} \cdot p = A N n_e = \text{const}, \quad (4)$$

где A — некоторый коэффициент пропорциональности;
 N — концентрация частиц газа;
 n_e — концентрация электронов.

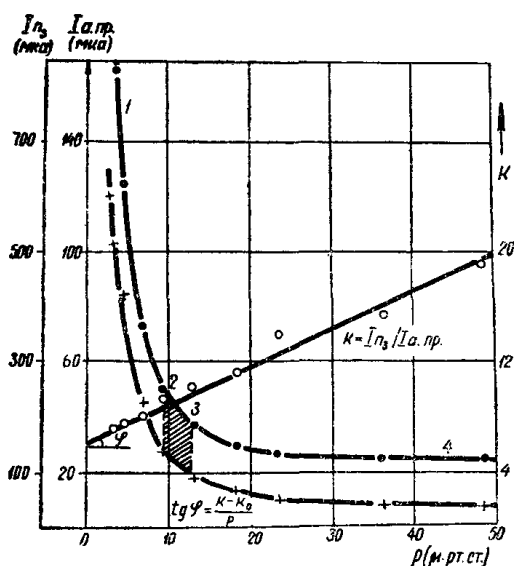


Рис. 6. Зависимость поджигающего тока $I_{пз}$ и предпускового тока $I_{анр}$ от давления газа p при $U_a = 700$ вольт = const. Зависимость k от p (опытный прибор, рис. 3).

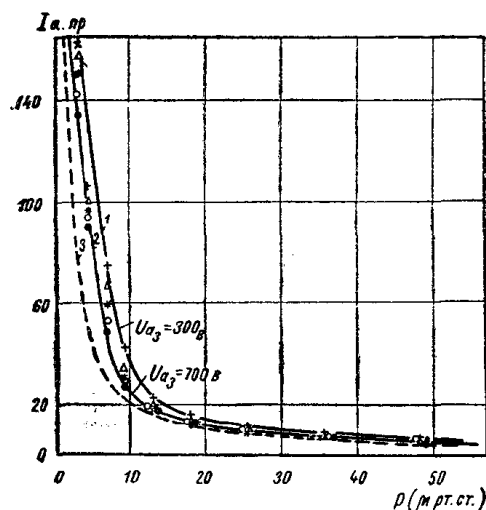


Рис. 7. Зависимость анодного предпускового тока $I_{анр}$ от давления газа p . Параметр — анодное напряж. зажигания $U_{аз}$; 1, 2, — экспериментальные кривые; 3 — гипербола.

Исходя из кинетической теории газа для критического числа столкновений частиц двух разных сортов, можно написать выражение:

$$Z_{кр.} = B N n_e Q c_e, \quad (5)$$

где Q — эффективное поперечное сечение всех молекул, находящихся в 1 см^3 ;

c_e — средняя относительная скорость электронов.

Поскольку произведение $Q c_e$ для ртути есть величина приблизительно постоянная [3], то:

$$Z_{кр} = B N n_e = \text{const}. \quad (6)$$

Последнее выражение содержит важное условие поджигания газа. Таким образом, пробой газа и образование плазмы наступает тогда, когда число столкновений электронов с атомами газа будет определяться постоянной величиной, пропорциональной произведению концентраций электронов и частиц газа.

Заключение

Произведенные опыты показывают, что разработанная нами камерная экспериментальная трубка с поджигающей нитью является удобным инструментом для изучения предпробивного состояния газа при наличии термоэлектронной эмиссии.

Используя метод однократных зажигания трубки и измеряя величины поджигающих предпусковых токов при изменениях анодных напряжений и давлений газа, было установлено:

1. Подобие зависимостей напряжений зажигания анода от поджигающих и предпусковых токов при различных давлениях газа.

2. Подобие зависимостей поджигающих и предпусковых токов от давления газа при различных напряжениях зажигания анода.

3. Последняя зависимость подчиняется закону гиперболы. Из закона гиперболы вытекает постоянство произведений давления газа на поджигающий или предпусковой токи. Эти произведения отражают основное условие поджигания газа: число соударений электронов с частицами газа, приводящее к пробоем газа, является величиной постоянной и пропорциональной произведению их концентраций.

Это условие поджигания будет иметь место и в более сложных условиях развития разряда, часто встречающихся в практике: зажигание главного разряда с помощью дежурной дуги при различных стадиях ее развития, наличие накаливаемого или холодного катода, сложной формы электродов, низкого давления газа, различной степени экранировки электродов и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А. В. Сборник трудов по технической физике. Изд. АН СССР 189, 1947.
2. Knoll-Ollendorff-Rompl. „Gasentladungstabellen“. Berlin. Verlag von Z. Springer, 43, 1935.
3. Спивак Г. В. и Столярова Е. Л. Вестник МГУ № 5, 31, 1952.

Новосибирск, Западно-Сибирский
филиал АН СССР.
