

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 9—1950

## Ф И З И К А

А. А. ЗАЙЦЕВ

### КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СЛОИСТОМ ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ЯВЛЕНИЯ

#### ВВЕДЕНИЕ

Исследования свойств ионизированного газа показывают, что в разрядной трубке возможны несколько типов колебаний [1, 2, 3]. Некоторые из них возникают спонтанно в зависимости от условий, существующих внутри трубки, и представляют собой собственные или внутренние колебания разряда. Колебания тока и потенциала горения, обусловленные периодическими процессами внутри разряда, исследованы в ряде работ. Однако полученные разными авторами данные об условиях возбуждения колебаний противоречивы.

Грановский и Быховская [4] обнаружили и подробно изучили различные по характеру колебания в ртутной дуге низкого давления. Авторы описали опыты, которыми доказывается, что местом возникновения колебаний при фиксированном катодном пятне является анодная область.

В настоящей работе исследованы условия возникновения колебаний и их закономерности в неоднородном тлеющем разряде в неоне и аргоне. Как известно, тлеющий разряд имеет сложную структуру. Однако для изучения собственных колебаний тлеющий разряд является формой наиболее подходящей по следующим причинам:

- 1) здесь нет влияния на процессы внутри разряда со стороны внешних полей, связанных с током накала термического катода;
- 2) плотность газа во всем разрядном промежутке при токах до 5—7 мА остается постоянной и равномерной, так как газ нагревается в незначительной степени и его температуру можно принять равной комнатной;
- 3) отдельные части разряда при малых давлениях резко выражены и параллельно с электрическими измерениями можно вести наблюдения над световыми явлениями в разряде.

Когда анод граничит с положительным столбом, процессы вблизи него тесно взаимодействуют с явлениями в столбе. В неоднородном разряде параметры столба непрерывно меняются вдоль оси трубки. Во многих случаях электрическая неоднородность столба обнаруживается визуально в виде образования страт, — положительный столб становится слоистым. В таком разряде простое передвижение анода относительно катода резко меняет условия в области анода. Благодаря этому удается выяснить взаимную связь между колебательным процессом и процессами в анодной

области, не прибегая для этого к каким-либо внешним средствам, нарушающим разряд.

Данная работа по своим результатам отчасти примыкает к исследованиям Грановского и Быховской, хотя условия опыта в том и другом случае были различными. Одновременно в существенных пунктах получены новые результаты.

### ОПИСАНИЕ ОПЫТОВ И АППАРАТУРЫ

В проведенных опытах изучались колебания потенциала горения в цепи, состоящей из последовательно соединенных источника постоянного напряжения (батарея аккумуляторов), омического сопротивления и разрядного промежутка. Измерения происходили в трубках диаметром 3,5 см и длиной 60 см. Электроды были плоские ( $\varnothing = 3$  см), из которых один (обычно анод) подвижный. Расстояние между электродами можно было менять в пределах от 0 до 40 см. Анод изготовлялся из Ni, Mo или Al. В одном случае анодом был неподвижный секционированный электрод, состоящий из 6 колец шириной 3 мм и центрального штифта диаметром 0,5 мм. Зазор между кольцами был 0,2—0,3 мм. Отдельные секции имели свой вывод и могли порознь включаться в качестве анода.

В предварительных опытах не обращалось особого внимания на перекидывание разряда в лежащую за катодом область. Однако скоро выяснилось, что появление мелких беспорядочных вспышек на поверхности вводов за катодом сильно отражается на характере колебаний. Отдельно роль анодной области в возникновении колебаний удастся выявить в трубках, в которых вводы должным образом изолированы, а все пространство, расположенное за катодом, надежно защищено от разряда. При этом с изменением расстояния анод—катод никаких явлений свечения за катодом не возникает.

Сила разрядного тока менялась от 0,1 до 20 mA, давление газа—от десятых долей до нескольких мм ртутного столба.

Для получения слоистого разряда стекло трубки и металлические части не прогревались под вакуумом. Производилась лишь обработка трубки разрядом в течение 30 минут при режиме, несколько повышенном по сравнению с нормальным режимом трубки. Затем трубка наполнялась несколько раз соответственно неоном или аргоном. Возникали широкие страты, имеющие резкие очертания у катодного конца и менее резкие по направлению к аноду. Измерения производились через 5—7 минут после включения разряда. В течение этого времени условия в трубке становились настолько стабильными, что достигалась необходимая повторяемость результатов.

Наблюдения велись при помощи электронного осциллографа. Чувствительность отклонения была предварительно определена на переменном токе. Измерялась разность между ординатами максимумов и минимумов переменной составляющей потенциала горения (в дальнейшем условно названная нами амплитудой колебаний). Частота до 100 кГц измерялась получением фигур Лиссажу на экране электронно-лучевой трубки. Для этого на вертикально-отклоняющие пластины осциллографа подавалось исследуемое напряжение, а на горизонтально-отклоняющие пластины напряжение от генератора, дающего форму кривой, близкую к синусоиде. Измерения более высоких частот производились при обычной для осциллографа пилообразной разверстке по оси времени. Разверстка градуировалась при помощи ГСС. Одновременно наблюдалось мигание свечения у анода при помощи вращающегося зеркала.

## АНОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Нами наблюдались колебания, возникновение которых связано с условиями у анода. Эта связь легко обнаруживается в разряде с слоистым положительным столбом. На рисунках 1 и 2 (кривая 1) показана зависимость амплитуды колебаний от расстояния между электродами при постоянной силе тока [ $S = \varphi(d_{a-k})$ ]. Существуют области, где колебаний нет<sup>1</sup>. Колебания периодически возникают и исчезают, причем период появления их равен в среднем длине, на которой страты повторяются, или иначе — расстоянию от начала одной страты до начала соседней.

Передвижение анода относительно катода не может вызывать непосредственно каких-либо изменений в состоянии разряда в катодных частях или же в объеме столба вдали от анода. Но в слоистом разряде будут периодически меняться электрические условия у анода. Если бы анод при всех условиях играл только пассивную роль в качестве коллектора отрицательно заряженных частиц, поступающих из разряда, и в анодной области не происходили дополнительные процессы, то было бы еще невозможно объяснить наблюдаемые факты. Если, однако, в разряде течет сильный ток, как это

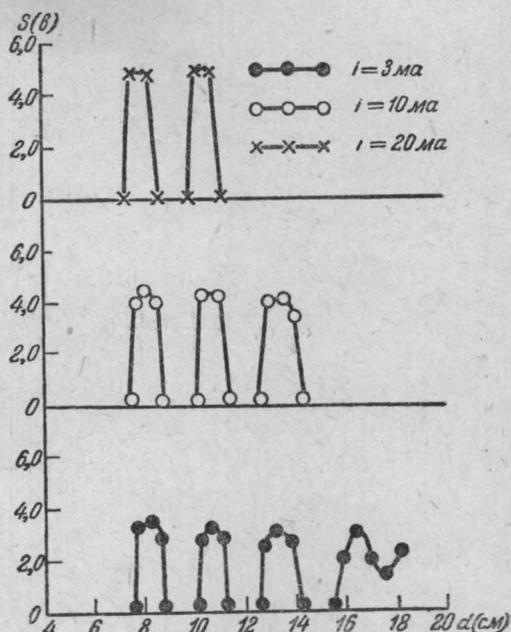


Рис. 1. №.  $p = 2$  мм Hg. Анод = 3-е кольцо

имеет место в тлеющем разряде и особенно в дуге, пространственные заряды в анодной области вызывают особые явления. В таком случае при изменении условий у анода будет меняться и роль анодной области в разряде. Ход кривой  $S = \varphi(d_{a-k})$ , показанный на рисунках 1 и 2, является наиболее типичным, когда колебания наблюдаются в разряде с достаточно резкими стратами. При по-

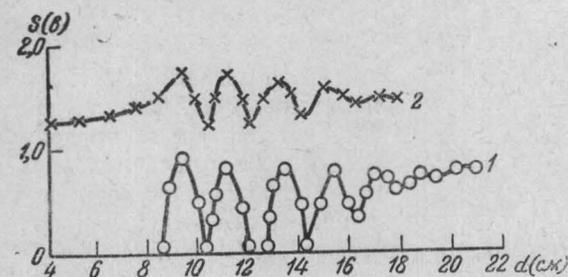


Рис. 2. Аг.  $p = 0,4$  мм Hg. Анод-диск.  
1 —  $i = 1,5$  мА, 2 —  $i = 3$  мА

степенном переходе от слоистого разряда к однородному, условия у анода с изменением расстояния между электродами будут меняться все меньше и меньше. Поэтому на кривой  $S = \varphi(d_{a-k})$  должны появиться максимумы и минимумы.

<sup>1</sup> Приборы позволяли обнаруживать амплитуды в сотые доли вольта. Таким образом, вряд ли имеются основания сомневаться, что существуют области, в которых колебания действительно не возбуждаются.

Если колебания возбуждаются в анодной области, то естественно ожидать, что будут иметь значение форма и размеры анода. Опыт показывает,

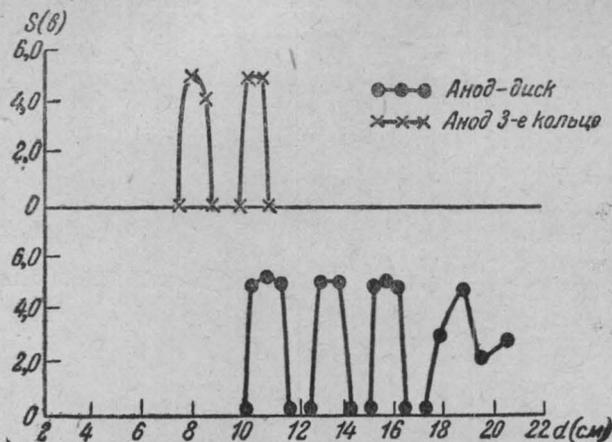


Рис. 3. №.  $p=2$  мм Hg.,  $i=20$  mA

что при прочих равных условиях области колебаний зависят от размеров анода (рис. 3). Когда анодом служит 3-е кольцо разделенного электрода,

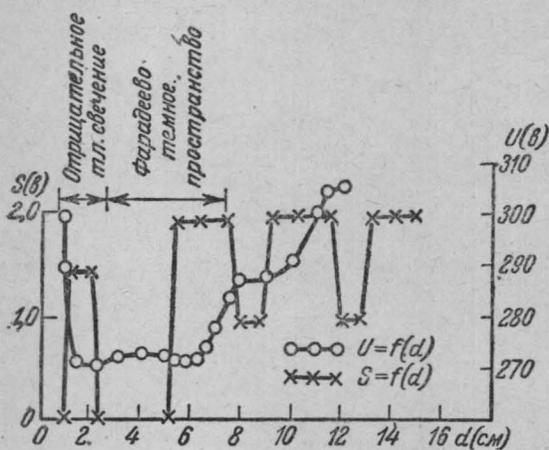


Рис. 4. №.  $p=2$  мм Hg.,  $i=3$  mA. Анод-штифт.

колебания возникают в пределах первой и второй страты. При сплошном электроде колебания появляются, начиная со второй страты. Условия, при которых получены кривые, изображенные на рисунках 1 (нижняя кривая) и 4, отличаются только тем, что в первом случае анодом был диск, во втором — штифт разделенного электрода. Как показывает рис. 4, колебания во втором случае не исчезают полностью, пока анод находится в пределах положительного столба, однако меняется периодически

амплитуда колебаний. При других условиях колебания могут периодически появляться и исчезать и при анод-штифте (рис. 10).

Амплитуда колебаний также зависит от размеров анода (табл. 1). В данном случае анодом служат кольца разделенного электрода (нумерация от центра), а измерения произведены в пределах второй страты. Вообще говоря, включение различных колец в качестве анода должно быть эквивалентно изменению также и геомет-

Таблица 1

Ar,  $p=5,0$  мм Hg,  $i=3$  mA

Номер кольца	1	2	3	4	5	6
Амплитуда колебаний в % . . . . .	62	78	84	94	100	81

ри анода в связи с наличием поблизости других, свободных колец.

Анодные колебания, обычно весьма стабильные по амплитуде, частоте и фазе, становятся неустойчивыми (не удается синхронизировать с разверткой осциллографа на длительное время), как только свечение у анода начинает мигать. Мигание свечения у анодного конца разряда часто наблюдается при больших давлениях и токах, а также при больших расстояниях между электродами и простирается от анода на длину одной и редко двух страт. Остальная часть столба вплоть до фарадеева темного пространства имеет при этом ровное свечение. Если придвинуть анод к границе области ровного свечения, то и мигание у анода исчезает. Явление мигания, резко выраженное у анода, наблюдается при некоторых условиях и в однородном по свечению разряде, но там оно простирается на большую часть разряда. Повидимому, страты в разряде являются фактором, до некоторой степени стабилизирующим процессы в области у анода. Устойчивые колебания могут чередоваться с неустойчивыми в пределах одной области колебаний (рис. 5). В таком случае едва заметные мигания локализуются в непосредственной близости от анода. Иногда фигуры колебаний на экране осциллографической трубки дрожат, что бывает обычно при переходе колебаний от устойчивой формы в неустойчивую или наоборот.

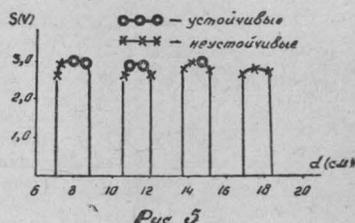


Рис. 5. №.  $p=2$  мм Hg.  $i=10$  mA. Анод-диск

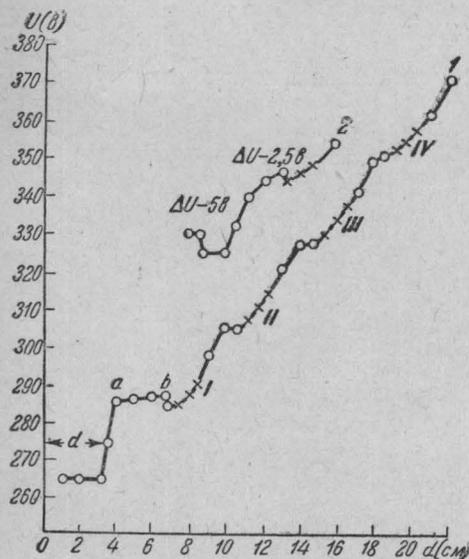


Рис. 6. №. 1 —  $p=1$  мм Hg.,  $i=3$  mA, 2 —  $p=0,8$  мм Hg.,  $i=0,7$  mA

в точке  $b$ , и никаких колебательных процессов при этом не наблюдается.

Когда анодом служит штифт разделенного электрода, колебания могут возникать и в отрицательном тлеющем свечении (см. рис. 4). Как видно из кривой  $U=\varphi(d_{a-k})$ , анодное падение здесь должно существовать и в фарадеевом темном пространстве. Это подтверждается еще и тем, что в пределах всего фарадеева пространства на аноде наблюдается светящаяся пленка. Колебания в отрицательном тлеющем свечении появляются

вместе с образованием анодного свечения, имеющего форму полусферы. Измерения, произведенные электростатическим вольтметром, показывают, что свободные кольца по отношению к штифту заряжаются отрицательно. Необходимо отметить, что разница в потенциалах на участке отрицательного тлеющего свечения значительно большая, чем в фарадеевом темном пространстве. Наличие отрицательно заряженных колец вокруг штифта будет затруднять в той или иной степени попадание на него электронов. Для того чтобы обеспечить прохождение тока через трубку, необходимы увеличение эффективной поверхности анода и дополнительная ионизация в анодном слое.

Колебания могут возникать также, если анод малых размеров нахо-

Таблица 2

Аг.  $p = 1,5$  мм. Нг.  $d_{a-3} = 2$  см.  $d_{k-3} = 40$  см

$i$ (mA)	$s_{a-3}$ (%)	$s_{k-3}$ (%)	$s_{a-k}$ (%)
0,5	100	57	$\approx S_{a-3} - S_{k-3}$
1,0	100	61	То же
5,0	100	63	» »

дится в кружковом темном пространстве на расстоянии 2—3 мм от переднего края отрицательного тлеющего свечения. В качестве анода при этих наблюдениях был использован цилиндрический зонд. И в данном случае появление колебаний сопровождается образованием у анода тлеющего свечения.

Таким образом, в зависимости от условий опыта процессы у анода

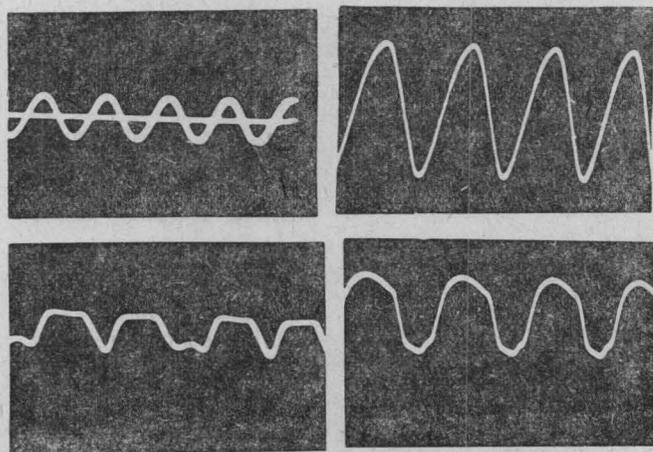


Рис. 7. Не. Формы колебаний

становятся более или менее благоприятными для возникновения колебательных процессов, и колебания наблюдаются, когда анод находится в разных частях разряда, а не только в положительном столбе.

Материал, из которого сделан анод, не влияет на характер и закономерности колебаний. Измерения амплитуды колебаний путем включения осциллографа между анодом и зондом ( $s_{a-3}$ ) и катодом и зондом ( $s_{k-3}$ ), как это делали Грановский и Быховская [4], также подтверждают, что

колебания возбуждаются именно в анодной области. В табл. 2 сопоставлены результаты, полученные при 3 токах, причем  $s_{a-3}$  всюду принято равной 100%.

Из таблицы следует, что максимальная амплитуда приходится на анодную область, как и должно быть, при возбуждении в этой области колебаний.

Колебания при больших размерах анода часто бывают весьма сложными, содержащими много гармоник. Формы колебаний и частота зависят от основных параметров разряда. При малой поверхности анода (штифт разделенного электрода) колебания более правильные и имеют в большинстве случаев релаксационный характер. При малых токах и преимущественно в начале столба колебания бывают близкими к синусоидальному. На рис. 7 показано несколько фотографий формы колебаний.

Как видно из рис. 8 и 9, частота заметно меняется в пределах каждой области колебаний. При изменении силы тока и особенно давления газа в трубке при постоянном  $d_{a-k}$  меняется также положение анода в стратах. В связи с этим изменяется положение анода и в областях колебаний, в результате чего анод может оказаться даже вне пределов области колебания. Поэтому измерения зависимости частоты от давления или от силы тока в слоистом разряде имеет смысл произ-

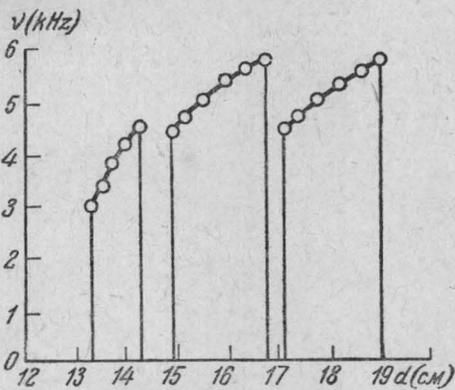


Рис. 8. Ar.  $p=0,27$  mm Hg,  $i=3$  mA. Анод-диск

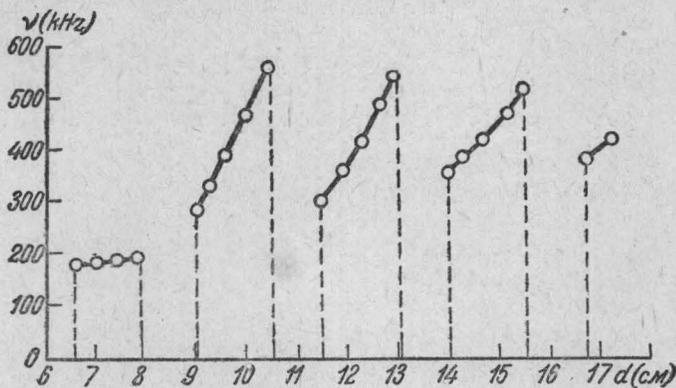


Рис. 9. Ar.  $p=1,58$  мм Hg,  $I=2,5$  mA. Анод-штифт

водить в конце или в начале одной выбранной области колебаний. Очевидно, что это может быть достигнуто лишь путем непрерывного изменения  $d_{a-k}$  вместе с давлением газа или силой тока. На рис. 10 показана зависимость частоты от давления, когда анод-диск находится в конце второй от катода области колебаний. Частота растет с уменьшением давления. Изменение частоты в зависимости от тока при двух давлениях показано на рис. 11. При больших токах может играть некоторую роль изменение температуры газа и уменьшение плотности газа между электродами. Уменьшение плотности газа должно привести к ро-

сту частоты в соответствии с кривой на рис. 10. Чтобы уменьшить влияние изменения плотности газа, измерения частоты производились при кратковременном включении разряда. Как видно из рис. 11, частота с изменением тока меняется незначительно. Изменение тока и частоты сопровождается изменением формы колебаний.

#### ОСОБЕННОСТИ СВЕЧЕНИЯ У АНОДА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРАТ В НЕОНЕ И АНОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Когда анод удаляется от катода, отдельные страты, образуясь у анода, отслаиваются от него. Явления у анода при формировании страт имеют сложный характер и протекают по-разному, в зависимости от давления

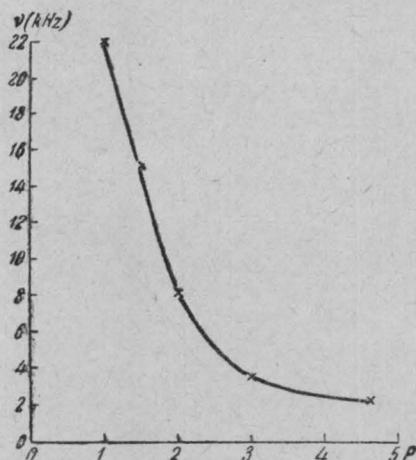


Рис. 10. №.  $i=6$  mA

газа, силы тока и от размеров анода. При прочих равных условиях разница наблюдается в зависимости от номера страты (если их считать по порядку от границы фарадеева темного пространства), что безусловно

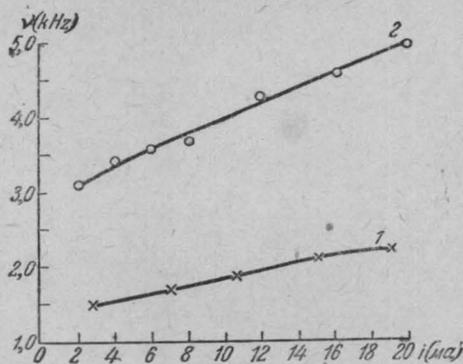


Рис. 11. №. 1— $p=5$  мм Hg, 2— $p=3$  мм Hg

связано с тем, что различные страты в загрязненных инертных газах не эквивалентны друг другу. Оптические наблюдения удобно вести в неоне, так как свечение неона превосходит по яркости свечение аргона и, кроме того, излучение неона по цвету резко отличается от излучения от загрязняющих примесей. В фарадеевом пространстве до появления

анодного тлеющего свечения световые явления имеют качественно одинаковый характер во всех случаях, когда размеры анода сравнимы с сечением трубки. Если анод передвигается от катода, то при расстоянии  $d$  (см. рис. 6) на его поверхности скачком появляется синее свечение (анодная пленка). При постепенном увеличении расстояния яркость свечения возрастает. В точке  $a$  цвет пленки становится розовым, и дальше, в точке  $b$  возникает анодное тлеющее свечение. С появлением тлеющего свечения у анода начинается и образование положительного столба.

При формировании страт у анода отмечаются следующие случаи:

1. На внешней границе розовой анодной пленки возникает равномерное бледносинее свечение, которое с увеличением расстояния между анодом и катодом, становится более выраженным. Одновременно яркость пленки постепенно уменьшается. Наконец, свечение у анода приобретает очертания, характерные для страт, и отрывается от электрода. В этот момент яркость анодной пленки может уменьшиться настолько, что поверхность анода будет казаться темной. Условия у анода здесь должны быть близкими к тем, какие существуют в фарадеевом темном пространстве. В других случаях анодная пленка не исчезает полностью в процессе формирования страт, но бывает заметно в различных стадиях лишь изменение в большей или меньшей степени ее яркости. При такой картине явлений никаких колебаний не наблюдается.

2. На фоне анодной пленки возникает один или несколько светящихся сине-розовых бугорков (пятен), которые могут появиться одновременно или друг за другом. Образование таких бугорков сопровождается скачкообразным уменьшением потенциала горения на 2—5 в. Иногда пятна мигают, оставаясь на одном месте. В момент возникновения пятен яркость анодной пленки в разной степени уменьшается, но сама пленка не исчезает полностью. В дальнейшем бугорки вытягиваются в виде светящихся полос (трубочек), которые, постепенно расширяясь, сливаются. Как правило, с момента появления бугорков и до полного слияния полос наблюдаются колебательные процессы (см. рис. 6, кривая 2, вторая страта). Когда на аноде имеется одно пятно, мигающее с различной частотой, то легко удается заметить, что колебания тока и потенциала горения более высокой частоты возникают и исчезают вместе с пятном. Наблюдения при помощи вращающегося зеркала показывают, что при этом пятно пульсирует также и с частотой колебаний. Таким образом, некоторые колебательные процессы несомненно связаны с пятнами на аноде.

Появление пятен может сопровождаться полным исчезновением анодной пленки. Это означает, конечно, что весь ток на анод стягивается в пределы пятен. В этом случае колебания обычно возникают не сразу вместе с пятнами, а лишь в стадии образования светящихся полос (см. рис. 6, кривая 2, первая страта).

3. Равномерное вначале свечение у анода, по мере расширения в процессе формирования страты, становится неравномерным, как и во втором случае. Колебания и здесь возникают, как только становится заметной неравномерность свечения по сечению (см. рис. 6, кривая 1, вторая, третья и четвертая страты).

#### КОЛЕБАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПЛАЗМЕННЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ У КАТОДА

Если область, лежащая за катодом, достаточно защищена от разряда, то при больших токах и малых давлениях разряд перебрасывается в эту

область трубки и там также появляется свечение. Обычно в таких случаях в просвете между диском катода и стенкой трубки возникают светящиеся вытянутые пятна, по цвету сходные с цветом свечения столба (плазмы). Появление плазменных образований в области у катода должно быть связано с электронами, поступающими в разрядный промежуток из закатодного пространства. В области расположения катода скорости электронов могут способствовать интенсивной ионизации и возбуждению атомов газа. В результате этого внутри плазменных образований условия будут близкими к тем, какие существуют в столбе.

В некоторых случаях такие плазменные пятна становятся источником колебательных процессов. Колебания наблюдаются всегда, если при уменьшении тока он приближается к пределу, когда пятна внезапно исчезают. Плазменные колебания в большинстве случаев накладываются на анодные. Доказательством того, что колебания действительно связаны с плазменными образованиями, служат следующие наблюдения:

1. На рис. 2 показаны кривые  $S = \varphi(d_{a-k})$ , одна из которых получена при отсутствии плазменных пятен (нижняя кривая), другая, — когда пятна существуют (верхняя кривая). Во втором случае колебания не исчезают полностью в тех местах, где при наличии одних анодных колебаний амплитуда становится равной нулю. Наблюдается лишь периодическое изменение амплитуды в зависимости от  $d_{a-k}$ . Как мы видели, анодные колебания не возникают, когда нет анодного падения потенциала. Между тем при наличии плазменных пятен колебания наблюдаются и тогда, когда анод находится в фарадеевом темном пространстве, где нет анодного падения и анодной пленки (анодная пленка исчезает при  $d_{a-k} = 7$  см).

2) На плазменные пятна действует внешнее магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом. Можно выбрать разрядный ток такой величины, что в отсутствие магнитного поля пятна будут существовать, а при приближении магнита к катоду они исчезают, или, наоборот, появляются при действии поля. Такие наблюдения показывают, что колебания возникают вместе с пятнами.

Плазменные колебания устойчивы и не отличаются по своему характеру от анодных. Частота их при равных условиях несколько больше частоты анодных колебаний.

#### ХАОТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПЕРЕБРАСЫВАНИЕМ РАЗРЯДА ЗА КАТОД

Когда разряд переброшен за катод, могут наблюдаться хаотические колебания потенциала горения, которые на экране осциллографа отмечаются в виде беспорядочно разбросанных пятен, асимметричных относительно оси развертки осциллографа. Это означает, что колебания потенциала горения несимметричны относительно его среднего значения и при этом преобладают положительные импульсы. Причиной хаотических колебаний является беспорядочное перемещение точек эмиссии электронов по поверхности вводов катода, что обнаруживается в виде отдельных мелких вспышек свечения на вводах. Эти колебания по своей природе вполне аналогичны хаотическим колебаниям в ртутной дуге при бегущем катодном пятне [4].

#### ВЫВОДЫ

Описанными опытами доказывается, что в слоистом разряде существуют области в зависимости от  $d_{a-k}$ , в которых вблизи анода возбуждаются колебательные процессы. Частота колебаний зависит от пара-

метров разряда и лежит в пределах от  $10^3$  до  $5 \cdot 10^3 \text{Hz}$ . Наблюдения над оптическими явлениями у анода показывают, что для области колебаний характерна ярко выраженная неоднородность свечения у анода. По распределению интенсивности свечения можно составить картину распределения объемных зарядов у анода и вызываемого им электрического поля. Структура электрического поля должна быть сложная, и у анода могут существовать не только значительные продольные градиенты потенциала, но и поперечные. Колебания наблюдаются не только тогда, когда анод находится в пределах столба, но и в других частях разряда. Характерным для всех случаев является появление вместе с колебаниями анодного тлеющего свечения.

Плазменные колебания могут иметь механизм одинаковый с анодными. Здесь, как и при анодных колебаниях, характерны сложное электрическое поле и значительные градиенты потенциала в пространстве вокруг плазменных образований.

В проведении некоторых опытов принимали участие студенты Храмова и Тюлина.

Автор признателен проф. Г. В. Спивак за интерес, проявленный им к данной работе.

Поступила в редакцию  
19. 5. 1950 г.

Лаборатория  
электронной оптики и осциллографии

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Власов А. А. Теория вибрационных свойств электронного газа и ее применения. Учен. зап. МГУ, вып. 75, кн. II, 1945.
2. Грановский В. Л. ДАН СССР, 28, 41, 1940.
3. Thomson I. I., Phil. Mag., 11, 697, 1931.
4. Грановский В. Л. и Быховская, ДАН СССР, 49, 399, 1945.

348