

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СТРАТИФИКАЦИИ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В АЗОТЕ

**В.А. Лисовский<sup>1,2</sup>, Е.П. Артющенко<sup>1</sup>, В.А. Коваль<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина  
Украина*

<sup>2</sup>*Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)  
Украина*

Поступила в редакцию 15.09.2011

В данной работе были исследованы условия стратификации положительного столба тлеющего разряда постоянного тока в азоте в трубках диаметром 8 мм и 55 мм. Показано, что в каждой разрядной трубке страты наблюдаются в замкнутых областях по току и приложенному напряжению в ограниченном диапазоне давлений газа. Получено, что первая (с катодного конца положительного столба) страта ярче выражена и имеет наибольшую длину. Толщина страт слабо зависит от разрядного тока, но уменьшается с ростом давления газа. Также страты с большим порядковым номером (от катодного края положительного столба) имеют меньшую толщину. Показано, что стратификация положительного столба хорошо подчиняется законам подобия. Наблюдается совпадение кривых погасания и областей существования страт, измеренных в различных разрядных трубках и построенных в зависимости от произведения давления газа и радиуса трубки  $pR$ . Приведенные толщины страт  $d/R$  (отношение толщины страт  $d$  к радиусу трубки  $R$ ) в различных трубках также хорошо согласуются друг с другом при построении их в зависимости от  $pR$ . Показано, что приведенные толщины страт подчиняются закону Гольдштейна-Венера  $d/R = C/(pR)^m$ . При низких значениях  $pR \leq 1$  константы  $C = 1,17$ ,  $m = 0,17$ , а толщина страт медленно уменьшается с ростом давления газа. При более высоких  $pR$  увеличение давления газа приводит к резкому сужению и расплыванию страт, а константы становятся равными  $C = 1$  и  $m = 1,7$ .

**Ключевые слова:** тлеющий разряд постоянного тока, положительный столб, страты, азот, низкое давление.

У цій роботі були досліджені умови стратифікації позитивного стовпа тліючого розряду постійного струму у нітрогені у трубках діаметром 8 мм та 55 мм. Показано, що в кожній розрядній трубці страти спостерігаються в замкнутих областях по струму і прикладеній напрузі в обмеженому діапазоні тиску газу. Отримано, що перша (з катодного кінця позитивного стовпа) страта яскравіше виражена і має найбільшу довжину. Товщина страт слабко залежить від розрядного струму, але зменшується з ростом тиску газу. Також страти з великим порядковим номером (від катодного краю позитивного стовпа) мають меншу товщину. Показано, що стратифікація позитивного стовпа добре підкоряється законам подібності. Спостерігається збіг кривих згасання і областей існування страт, виміряних у різних розрядних трубках і побудованих в залежності від добутку тиску газу і радіуса трубки  $pR$ . Наведені товщини страт  $d/R$  (відношення товщини страт  $d$  до радіусу трубки  $R$ ) у різних трубках також добре узгоджуються між собою при побудові їх залежно від  $pR$ . Показано, що наведені товщини страт змінюються у відповідності із законом Гольдштейна-Венера  $d/R = C/(pR)^m$ . При низьких значеннях  $pR \leq 1$  константи  $C = 1,17$ ,  $m = 0,17$ , а товщина страт повільно зменшується зі збільшенням тиску газу. При більш високих  $pR$  збільшення тиску газу призводить до різкого звуження і розпливання страт, а константи стають рівними  $C = 1$  і  $m = 1,7$ .

**Ключові слова:** тліючий розряд постійного струму, позитивний стовп, страти, азот, низький тиск.

In this paper we have investigated the conditions of stratification of the positive column of dc glow discharge in nitrogen in the tubes with a diameter of 8 mm and 55 mm. It is shown that in every discharge tube the strata are observed in the confined areas of the current and the applied voltage over a limited range of gas pressures. It was found that the first (from the cathode end of the positive column) striation is more pronounced and has a maximum length. The thickness of the striation depends weakly on the discharge current, but it decreases with increasing gas pressure. Also, the striation with high order number (from the cathode edge of the positive column) has a smaller thickness.

It is shown that the stratification of the positive column obeys the similarity laws. There is observed a coincidence of the extinction curves and the regions of existence of strata measured in a variety of discharge tubes and plotted against the product of gas pressure and tube radius  $pR$ . Reduced strata thickness  $d/R$  (ratio of the thickness of the striation  $d$  to the tube radius  $R$ ) in various tubes is also in good agreement between themselves when plotted against  $pR$ . It is shown that reduced strata thickness obeys the Goldstein-Wehner rule  $d/R = C/(pR)^m$ . At low values  $pR \leq 1$  the constants equal to  $C = 1.17$ ,  $m = 0.17$ , and the thickness of the stratum slowly decreases with gas pressure increasing. At higher gas pressure  $pR$  increase leads to an abrupt strata narrowing and spreading, and the constants become  $C = 1$  and  $m = 1.7$ .

**Keywords:** direct current glow discharge, positive column, strata, nitrogen, low pressure.

## ВВЕДЕНИЕ

Тлеющий разряд постоянного тока широко используется в таких приборах тлеющего разряда, как газоразрядные стабилизаторы напряжения (стабилитроны), выпрямители с тлеющим разрядом [1], а также газоразрядные лазеры (гелий-неоновые, углекислотные с добавкой азота и т.д.) [1]. Стратификация положительного столба снижает эффективность работы газоразрядного лазера, поэтому исследование условий существования и характеристик страт представляют значительный интерес [2 – 6].

Однородно светящийся положительный столб при определенных разрядных условиях расслаивается на чередующиеся темные и светлые области (слои), так называемые страты. В молекулярных газах они видны, как правило, на значительном участке положительного столба, тогда как в инертных они сильно затухают, и их наблюдение затруднено. Стоячие страты видны невооруженным глазом и легче всего наблюдаются в молекулярных газах, таких как водород, азот, а также в смесях инертных и молекулярных газов [4, 5]. В чистых инертных газах неподвижные страты могут существовать по анодную сторону от какого-либо значительного нарушения однородности плазмы, например катодной части разряда, зонда с большим отрицательным потенциалом, резкого сужения трубки, однако наблюдается их сильное затухание по длине столба. Бегущие страты глазом не видны из-за большой скорости их распространения. В чистых инертных газах их фазовая скорость направлена, как правило, от анода к катоду (положительные страты) со скоростями от десятков до нескольких тысяч метров в секунду в зависимости от сорта газа и разрядных условий. Частоты страт могут изменяться от единиц до тысяч кГц.

Экспериментальное изучение и описание стоячих страт началось гораздо раньше, чем бегущих, поскольку для их наблюдения не требуется специальных стробоскопических устройств. Однако в обзорных работах Недоспасова [7] и Пекарека [8] стоячим стратам уделено лишь небольшое внимание. В то же время, в молекулярных газах – таких, как водород, азот, воздух и др., – а также в смесях инертных газов с молекулярными стоячие страты наблюдаются в широком диапазоне разрядных токов и давлений газа и наиболее ярко выражены.

Обзор статей, посвященных исследованию стоячих и бегущих страт, можно найти в работах [4, 5, 7 – 9]. С практической точки зрения наиболее важно выяснить условия, при которых однородный положительный столб становится стратифицированным. Авторы работы [6] представили диаграмму различных состояний плазмы разряда в неоне, на которой показаны области существования однородного и стратифицированного разрядов. В работах [10, 11] исследованы бегущие страты в азоте. Обычно в положительном столбе тлеющего разряда в азоте наблюдаются стоячие страты, поэтому для создания бегущих страт авторы [10, 11] вводили в положительный столб дополнительный электрод, на который подавалось слабое переменное напряжение в килогерцовом диапазоне. Было получено, что такое возмущение положительного столба приводит к появлению нескольких видов бегущих страт, движущихся от места возмущения к катоду или аноду с различными фазовой и групповой скоростями. Авторы [10, 11] определили области существования каждого вида страт, их фазовые и групповые скорости, дисперсионные кривые (зависимости частоты ионизационных колебаний от волно-

вого вектора  $k$ ) и падение напряжения на каждом из видов страт в зависимости от разрядного тока при различных давлениях азота.

Клярфельд [12] занимался главным образом неподвижными ионизационными волнами. В некоторых смесях, например в смеси неона с водородом, Клярфельду удалось получить слабо затухающие (в сторону анода) неподвижные волны, которые можно было уничтожать (по анодную сторону) приложением отрицательного напряжения на зонд или внешним магнитным полем. Тем же путем удавалось в некоторых случаях привести неподвижные волны в движение или же остановить движущиеся волны. Клярфельд заключил из этих экспериментов, что нет принципиальной разницы между неподвижными и подвижными стратами – они являются периодическим повторением местного возмущения в плазме в сторону дрейфа электронов, причем он считал их явлением с большой амплитудой. Зайцев [13] исследовал подвижные ионизационные волны и вызывал их извне либо с помощью вспомогательного внутреннего электрода, либо модуляцией разрядного тока переменным напряжением с частотой, близкой к частоте волн. В режиме без самовозбуждения он вызывал искусственно ионизационные волны разной частоты, и, измеряя с помощью вращающегося зеркала или стробоскопа их скорость, он тем самым произвел первые измерения дисперсии ионизационных волн.

В работе [14] экспериментально исследовано формирование движущихся страт в неоне. Получено, что страты формировались из маленьких анодных пятен, которые обычно осциллировали с возрастающей амплитудой, увеличиваясь в размерах, и затем отрывались от поверхности анода. Эти страты с большой скоростью убегали к катодному краю положительного столба и затем исчезали. Автор [15] предложил уточненный метод, с помощью которого определил величины критического тока (ограничивающего область существования страт) в аргоне и ксеноне.

В разрядных трубках диаметром от 1 до 3 мм в гелии, неоне и их смесях экспериментально исследованы критический ток возбуждения ионизационных волн, закон дисперсии,

скорость, волновая форма и их зависимости от температуры газа [16]. Показано, что при уменьшении диаметра трубки волновое число и циклическая частота увеличиваются.

Авторы работы [17] выполнили пространственно-временные зондовые измерения параметров плазмы в S- и R-стратах в неоне. Получена двумерная пространственная структура электрического поля в стратах. В работе [18] была предложена нелинейная модель, описывающая моды ионизационных волн в плазме. С помощью этой модели получен гистерезисный переход между различными модами при изменении разрядного тока. S-, P- и R-страты, которые могут наблюдаться в разряде постоянного тока в инертных газах при низких давлениях и малых разрядных токах, изучены в работе [19]. С помощью численного решения кинетического уравнения Больцмана выяснены механизмы резонансного формирования функции распределения электронов по энергиям в S-, P- и R-стратах. Выполнены также зондовые измерения функций распределения электронов по энергиям в R-стратах в положительном столбе в неоне, результаты которых хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями.

Авторы работы [20] сообщают, что слоистый: положительный столб в молекулярных газах при некоторых условиях приобретает макроскопическую неустойчивость. Эта неустойчивость проявляется либо в медленном спонтанном перемещении слоистого положительного столба в сторону анода со скоростью порядка 1 см/мин, либо в медленных продольных колебаниях столба как целого. Области существования стоячих страт, как и бегущих, имеют сложную форму. Для водорода и кислорода они приведены, например, в работе [8], а для азота получены в [21]. Сравнение областей существования стоячих и бегущих страт показывает, что стоячие страты наблюдаются, как правило, при более низких давлениях и токах, чем бегущие.

В инертных газах систематические исследования областей существования стоячих страт практически отсутствуют, за исключением работы [22], где приводятся некоторые данные для неона (рис. 1). Из рис. 1 видно, что стоячие страты в неоне существуют, в ос-

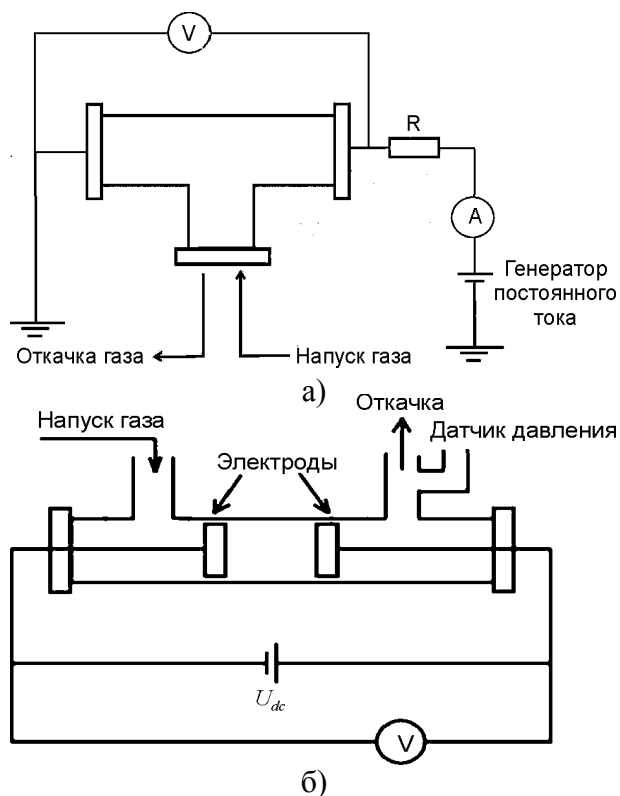


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. а) – схема камеры с радиусом электродов 55 мм; б) – схема камеры с радиусом электродов 8 мм.

новном, внутри той области, где нет бегущих страт (при токах 1 – 10 мА и давлениях 0,1 – 1 Торр). В работах [23, 24] затухающие неподвижные страты наблюдались в гелии, неоне и аргоне при давлениях до  $10^{-2}$  Торр и токах до 100 мА.

Очевидно, что с точки зрения выяснения природы стоячих страт интересен вопрос о возможных значениях их длины  $d$  в зависимости от разрядных условий. Зависимость  $d$  от давления и тока в молекулярных газах исследована во многих работах. Обобщая данные, можно сделать вывод, что: а) длина стоячих страт имеет порядок радиуса  $R$  трубки и убывает с ростом тока, стремясь к некоторому постоянному значению [4, 21]; б) длина стоячих страт  $d$  убывает при увеличении давления  $p$  и уменьшении радиуса  $R$  в соответствии с эмпирическим законом [4, 25]

$$\frac{d}{R} \cdot (pR)^m = \text{const},$$

где  $m < 1$  и зависит от рода газа.

В инертных газах стоячие страты обычно значительно длиннее, чем в молекулярных, их длина превосходит диаметр в несколько раз, в особенности при низких давлениях.

Добавление к инертному газу молекулярной примеси укорачивает стоячие страты тем сильнее, чем выше содержание примеси [26]. В большинстве газов длина стоячих страт несколько меньше, чем бегущих.

Многие исследователи [12, 23, 24, 27] отмечают, что ближайшая к катоду страта несколько отличается от всех последующих, являясь не только более резкой, но и наиболее длинной. Ясно, что слоистая структура положительного столба, обнаруживаемая по его неоднородному свечению визуально или с помощью фотоумножителей, должна находить отражение в неоднородности параметров столба, таких как потенциал, поле, концентрация и температура электронов.

Несмотря на большое количество статей, посвященных исследованию подвижных и стоячих страт в разряде постоянного тока, в литературе отсутствуют данные о связи области существования страт с областями появления и существования самого разряда (его кривыми зажигания и погасания, соответственно). Также в литературе нет единого мнения о форме страт. Например, в работах [5, 27] первая страта (расположенная с катодного края положительного столба) имеет более яркое свечение, но ее длина примерно равна длине последующих страт (расположенных ближе к аноду). Однако, как говорилось выше, в работах других исследователей [12, 23, 24] наблюдалось, что ближайшая к катоду первая страта является наиболее длинной. Также в литературе нет подробной информации о поведении каждой отдельной страты с изменением давления газа и разрядного тока. Поэтому целью данной работы было исследование зажигания и погасания разряда постоянного тока в азоте, области существования стоячих страт, а также длины отдельных страт с изменением давления газа и тока.

### УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования условий существования и характеристик страт в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока использовались две разрядные камеры, схемы которых показаны на рис. 1. В первом случае (рис. 1а) кварцевая разрядная трубка имела T-образную форму. Разряд зажигался в гори-

зонтальной части “Т”, на концах которой располагались катод и анод. Откачка и напуск газа производились через фланец, находящийся в основании вертикальной части “Т”. Этот фланец не был заземлен, и на него не подавались какие-либо напряжения. Внутренний диаметр разрядной трубки был 56 мм. Диаметр катода и анода был равен 55 мм. Расстояние между электродами было 395 мм. Азот подавался в камеру с помощью системы напуска газа СНА-1. Для регистрации давления газа в диапазоне от  $10^{-3}$  Торр до атмосферного мы использовали вакуумный термоэлектрический датчик 13ВТЗ-003. Откачка газа производилась с помощью форвакуумного насоса, что обеспечивало предельный вакуум порядка  $10^{-3}$  Торр. Источник постоянного напряжения подключался к аноду, а катод был заземлен. Величина разрядного тока регистрировалась цифровым амперметром, а напряжение на разряде – цифровым вольтметром. В разрядную цепь подключалось внешнее сопротивление величиной 50 кОм, которое ограничивало ток и препятствовало возникновению катодных пятен. Эксперименты проводились при давлениях азота  $p = 0,02 - 10$  Торр в диапазоне постоянного напряжения  $U_{dc} \leq 3000$  В.

Во втором случае (рис. 1б) кварцевая трубка имела внутренний диаметр 8 мм. Эксперименты проводились в геометрически подобных разрядных трубках. Так как диаметр второй трубки был в 7 раз меньше диаметра первой, то расстояние между электродами во второй трубке было равно 57,5 мм. В этом случае исследования проводились в диапазоне давлений азота  $p = 0,1 - 10$  Торр.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### СТРАТИФИКАЦИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В ТРУБКЕ ДИАМЕТРОМ 55 ММ

Первая часть экспериментов была проведена в Т-образной трубке, показанной на рис. 1а, в которой разряд зажигался в прямом (горизонтальном) участке “Т”. Целью данных исследований было выяснение условий существования стоячих страт, а также их длины при различных токах и давлениях азота.

На рис. 2 показана кривая погасания разряда  $U_{ext}$  (зависимость наименьшего напряжения горения разряда от давления газа), которая снизу ограничивает диапазон существования стоячих страт в тлеющем разряде в азоте. Страты наблюдались в диапазоне давлений, ограниченном на рис. 2 вертикальными пунктирными линиями. Напряжение  $U_{high}$  является максимальным напряжением, при котором страты исчезают. На растущем с давлением газа участке кривой  $U_{high}$  суммарная длина катодного слоя, отрицательного свечения и темного фарадеевского пространства достигала расстояния между электродами, а положительный столб исчезал. Вместе с ним исчезали и страты, которые могут наблюдаться только в положительном столбе.

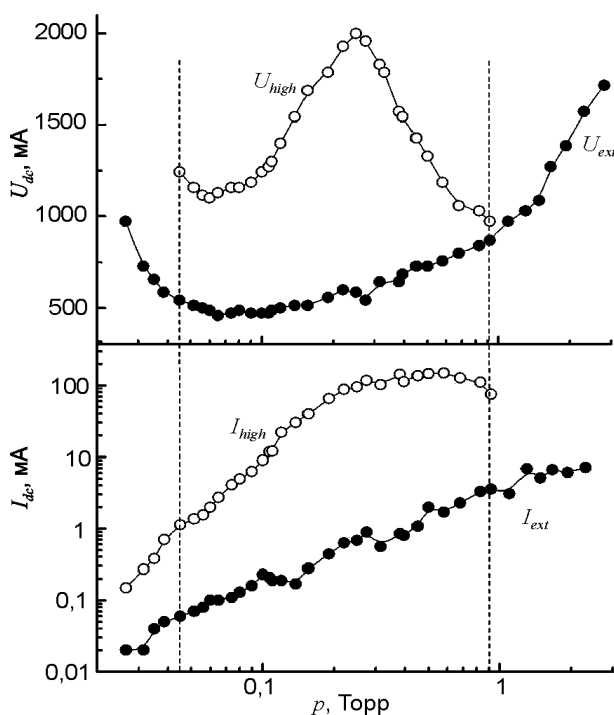


Рис. 2. Зависимость напряжения  $U_{ext}$  и тока погасания  $I_{ext}$  разряда, а также максимальных напряжения  $U_{high}$  и тока  $I_{high}$  существования страт от давления азота в трубке диаметром 55 мм.

На рис. 3 представлены фотографии разряда со стратифицированным положительным столбом для различных токов. Из рис. 3 следует, что при небольших токах хорошо видны только 2 – 3 первых страты, находящихся с катодного конца положительного столба. Остальная часть столба визуальнo выглядит однородной. Однако при повышении тока практически весь положительный столб становится слоистым, страты хорошо видны,

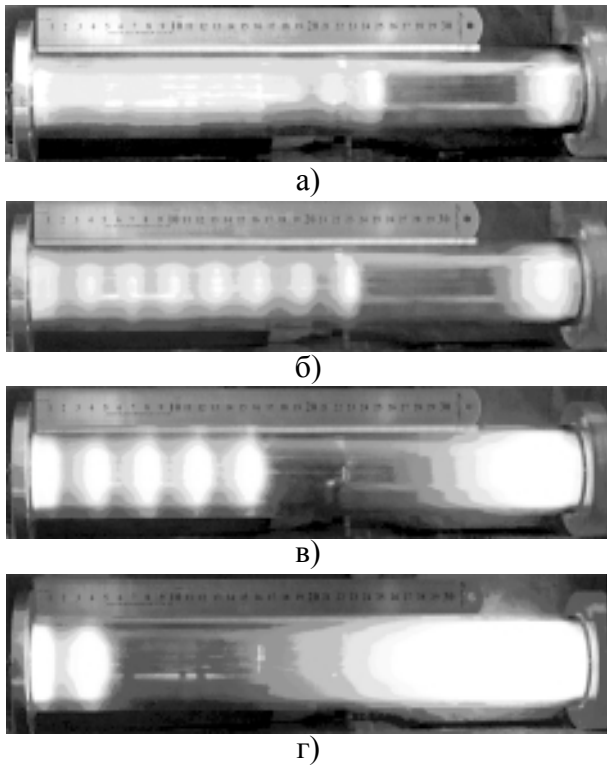


Рис. 3. Фотографии разряда при давлении азота  $p = 0,2$  Торр и разрядных токах: а) – 0,7 мА; б) – 1,7 мА; в) – 9 мА; г) – 29,3 мА. Анод располагается слева, катод – справа.

а длина столба уменьшается. И при некоторых максимальных значениях напряжения  $U_{high}$  и тока  $I_{high}$  положительный столб вместе со стратами полностью исчезают.

На падающем участке кривой  $U_{high}$  положительный столб с ростом тока не исчезал, но страты расплывались и столб становился однородным. При давлениях азота выше 1 Торр страты не наблюдались во всем исследованном в настоящей работе диапазоне разрядных токов.

На рис. 4 показана фотография разряда при давлении азота  $p = 1$  Торр с однородным положительным столбом.



Рис. 4. Фотография разряда при давлении азота  $p = 1$  Торр и разрядном токе 46 мА. Анод располагается слева, катод – справа.

Из фотографий на рис. 3 видно, что толщина страт не остается постоянной при фиксированном давлении газа, а изменяется с ростом разрядного тока.

На рис. 5 показаны зависимости толщины первой (с катодного конца положительного столба) страты от величины разрядного тока при различных давлениях азота.

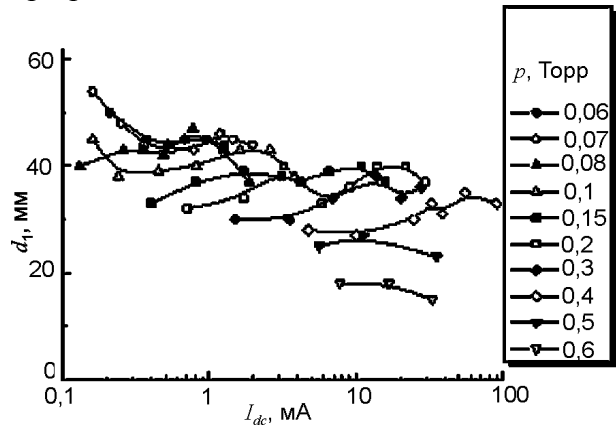


Рис. 5. Зависимость толщины первой страты от разрядного тока при различных давлениях азота. Диаметр трубки 55 мм.

Из рис. 5 видно, что толщина первой страты с ростом разрядного тока ведет себя монотонно, оставаясь почти постоянной. Увеличение давления приводит к уменьшению толщины первой страты.

Из фотографий на рис. 3 также следует, что страты в положительном столбе не являются равноценными, так как первая с катодного конца столба страта является более толстой и яркой, чем последующие. Авторы работ [12, 23, 24, 27] также наблюдали, что первая страта является наиболее длинной.

На рис. 6 показаны зависимости толщины страт от их порядкового номера (от катодного края столба), измеренных для трех различных разрядных условий.

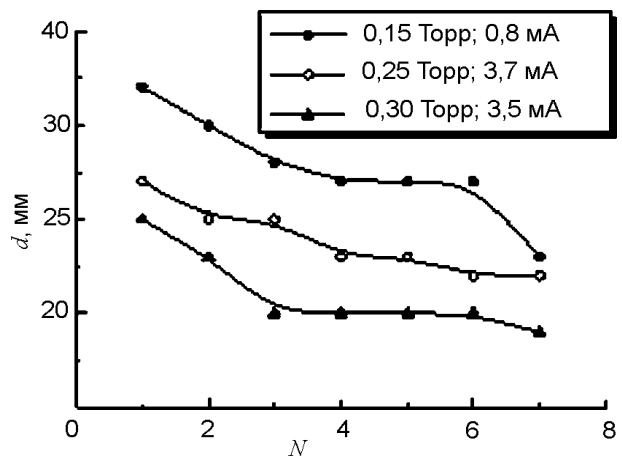


Рис. 6. Зависимость толщины страты от ее порядкового номера. Диаметр трубки 55 мм.

Из рис. 6 видно, что чем дальше страта отстоит от катодного края положительного столба, тем более узкой она является.

Как следует из рис. 5, толщина страт с ростом разрядного тока изменяется в не очень широких пределах. Поэтому в данной работе значения толщин страт были усреднены для каждого фиксированного давления газа.

На рис. 7 показаны полученные таким образом средние толщины первых трех страт от давления азота. Из рисунка видно, что при  $p < 0,4$  Торр средняя толщина первой страты монотонно уменьшается с давлением, а при более высоких давлениях  $p > 0,4$  Торр она сужается гораздо быстрее. Вторая и третья страты выражены менее ярко, чем первая, и их средние толщины ведут себя немонотонно, что может быть связано с большой ошибкой измерения их толщины.

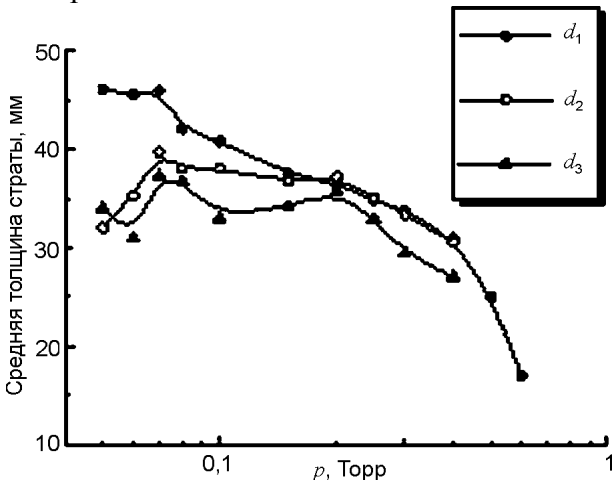


Рис. 7. Зависимость средней толщины первых трех страт от давления азота. Диаметр трубки 55 мм.

### СТРАТИФИКАЦИЯ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА В ТРУБКЕ ДИАМЕТРОМ 8 ММ

Во второй серии экспериментов стратификация положительного столба исследовалась в разрядной трубке диаметром 8 мм, показанной на рис. 1б. В этом случае разряд горит при более высоких давлениях, чем в рассмотренной выше трубке диаметром 55 мм. Поэтому свечение положительного столба было более ярким, что облегчало наблюдение страт.

На рис. 8 показаны кривая погасания  $U_{ext}$  разряда, а также минимальное  $U_{low}$  и максимальное  $U_{high}$  напряжения существования страт. В отличие от трубки диаметром 55 мм, в узкой трубке при низких давлениях газа

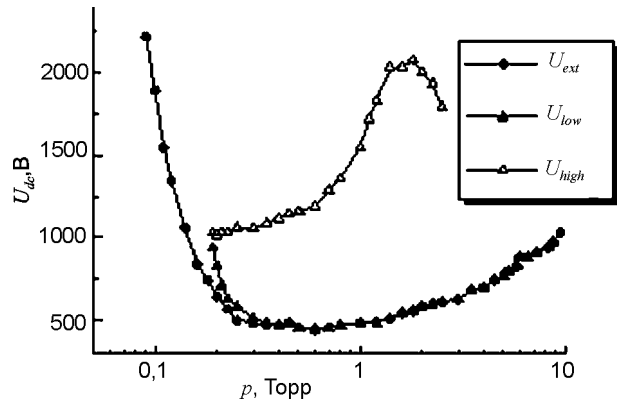


Рис. 8. Зависимость напряжения погасания  $U_{ext}$  разряда, минимального  $U_{low}$  и максимального  $U_{high}$  напряжений существования страт в трубке диаметром 8 мм от давления азота.

страты исчезали с понижением напряжения на электродах еще до погасания разряда. Положительный столб светился слабо, но визуально выглядел однородным. Это явление наблюдается в диапазоне давлений азота  $p = 0,19 - 0,35$  Торр и показано на рисунке как минимальное напряжение  $U_{low}$ . Кривая для максимального  $U_{high}$  напряжения также имеет возрастающий и убывающий участки, как и для трубки диаметром 55 мм. Однако в узкой 8 мм трубке убывающий участок не был до конца исследован, так как при больших давлениях газа через трубку течет сильный разрядный ток, приводящий к значительному распылению катода и разогреву разрядной камеры.

На рис. 9 представлены фотографии разряда в трубке диаметром 8 мм. Из этих фотографий видно, что страты в узкой трубке при низких давлениях более ярко выражены, чем в широкой трубке (это видно из сравнения фотографий на рис. 3, 4 и 9). Однако с повышением давления газа стратифицированный положительный столб становится однородным.

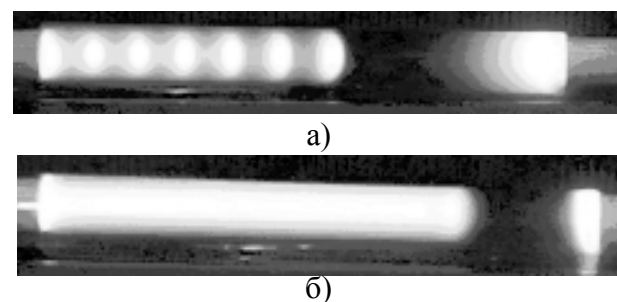


Рис. 9. Фотографии разряда для диаметра трубки 8 мм при: а) —  $p = 1$  Торр и токе 1,4 мА; б) —  $p = 3$  Торр и токе 2 мА. Анод располагается слева, катод — справа.

Из фотографии на рис. 9а также следует, что первая с катодного конца положительного столба страта имеет немного большую толщину, чем последующие.

На рис. 10 показаны значения толщины первой страты при различных токах и давлениях газа.

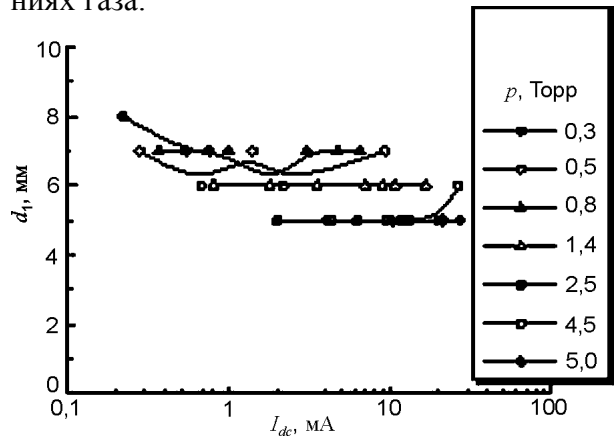


Рис. 10. Зависимость толщины первой страты от разрядного тока при различных давлениях азота. Диаметр трубки 8 мм.

Из рис. 10 видно, что изменение разрядного тока практически не влияет на толщину первой страты, но с ростом давления азота толщина страт становится меньше.

На рис. 11 показаны зависимости средних толщин первых трех страт от давления азота.

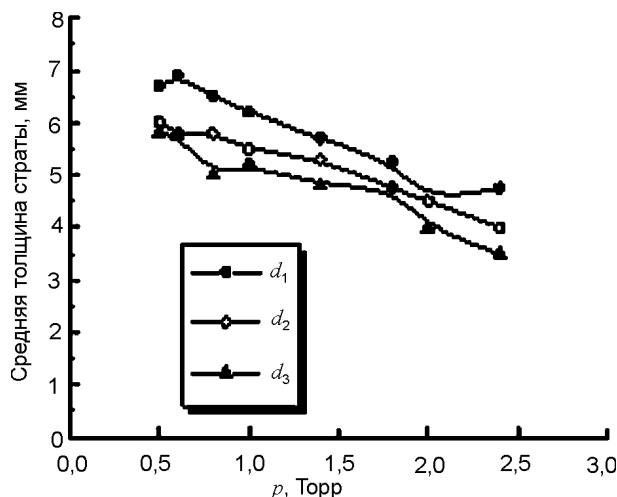


Рис. 11. Зависимость средней толщины первых трех страт от давления азота. Диаметр трубки 8 мм.

Из рис. 11 видно, что в исследованном диапазоне давлений газа при  $p < 2,5$  Торр средняя толщина всех трех страт монотонно уменьшается с давлением, причем скорости их сужения с давлением примерно одинаковы.

## ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОДОБИЯ ДЛЯ СТРАТИФИКАЦИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Так как эксперименты проводились в геометрически подобных трубках (диаметр и длина первой трубки были примерно в 7 раз больше, чем второй), то разрядные характеристики должны подчиняться законам подобия. В данном разделе проверим, выполняются ли законы подобия при стратификации тлеющего разряда.

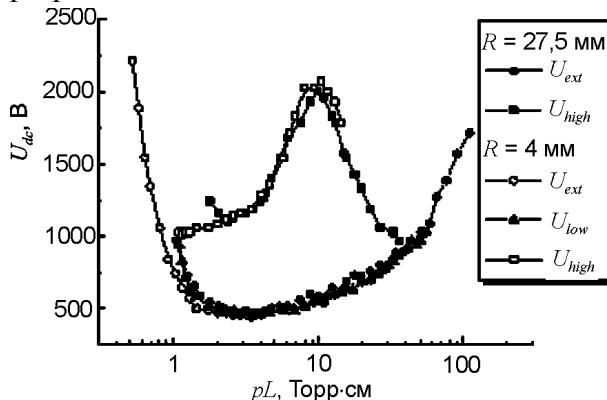


Рис. 12. Зависимость напряжения погасания  $U_{ext}$  разряда и максимального напряжения  $U_{high}$  существования страт в трубке диаметром 55 мм, а также напряжения погасания  $U_{ext}$  разряда, наименьшего  $U_{low}$  и максимального напряжения  $U_{high}$  существования страт в трубке диаметром 8 мм, от давления азота.

Как видно из рис. 12, кривые погасания, измеренные для обеих разрядных трубок и построенные в масштабе  $U_{ext}(pL)$ , практически наложились друг на друга. Это говорит о применимости законов подобия для описания погасания разряда. Практически совпадают также максимальные напряжения  $U_{high}$  существования страт в обеих трубках. Как говорилось выше, в узкой разрядной трубке убывающий участок максимального напряжения  $U_{high}$  по техническим причинам не был измерен. Однако, зная поведение этого убывающего участка в широкой трубке, можно предсказать его ход для узкой трубки.

Чтобы сравнить поведение страт в трубках с разными размерами, целесообразно использовать безразмерные толщины страт. Для этого нужно разделить толщины страт на радиус трубки  $R$ , в которой они были измерены.

На рис. 13 показаны такие “нормированные” на радиус трубки средние толщины трех первых страт, измеренные в обеих трубках, в



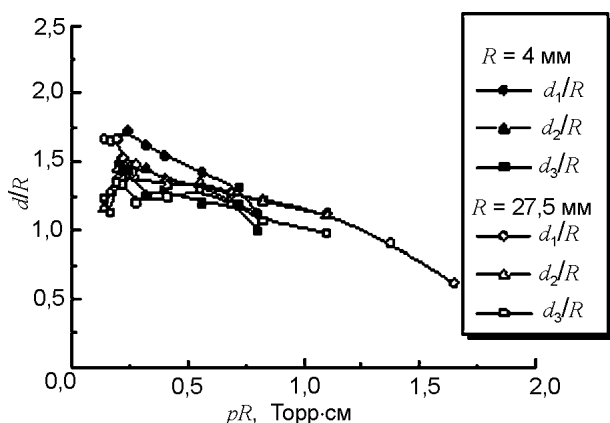


Рис. 13. Зависимость отношения средней толщины первых трех страт к радиусу трубки от произведения давления азота и радиуса трубки.

зависимости от произведения давления газа и радиуса трубки  $pR$ . Построенные в таком масштабе толщины страт, измеренные в трубках разного радиуса, хорошо согласуются друг с другом.

На рис. 14 показаны зависимости приведенных средних толщин первых страт от произведения  $pR$  для обеих разрядных трубок, построенных в логарифмическом масштабе. Из рисунка видно, что приведенные толщины страт хорошо описываются зависимостью

$$\frac{d}{R} = \frac{C}{(pR)^m}, \text{ которая называется законом}$$

Гольдштейна-Венера [4, 25]. Однако в различных диапазонах  $pR$  значения констант  $C$  и  $m$  различаются. В диапазоне низких значений  $pR \leq 1$  толщина страт медленно уменьшается с ростом давления газа и  $C = 1,17$ ,  $m = 0,17$ . При более высоких  $pR$  увеличение давления газа приводит к резкому сужению и расплыванию страт, при этом константы

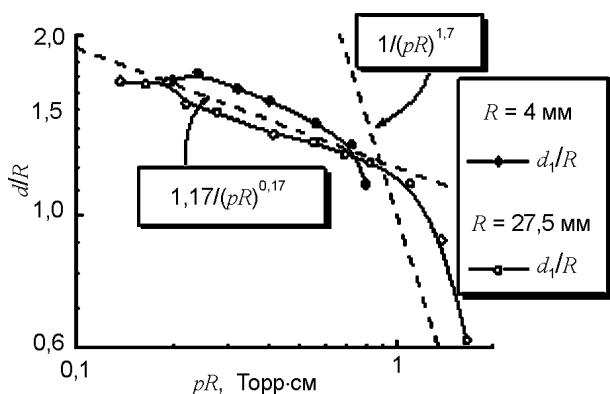


Рис. 14. Зависимость отношения средней толщины первой страты к радиусу трубки от произведения давления азота и радиуса трубки.

становятся равными  $C = 1$  и  $m = 1,7$ . В работе [25] были приведены следующие значения констант  $C = 2$  и  $m = 0,32$ .

Законы подобия справедливы для трубок с подобными размерами, к электродам которых приложены равные напряжения и через которые текут одинаковые разрядные токи.

Поэтому на рис. 14 показаны зависимости безразмерной средней толщины первой страты от тока для различных давлений газа в обеих разрядных трубках.

Из рис. 14 следует, что в широком диапазоне разрядных условий толщина первой страты составляет от одного до двух радиусов разрядной трубки.

### ВЫВОДЫ

В данной работе были выяснены условия стратификации положительного столба тлеющего разряда в трубках диаметром 8 мм и 55 мм. Страты наблюдаются в ограниченном диапазоне давлений газа, в замкнутых областях по току и приложенному напряжению.

Показано, что первая (с катодного конца положительного столба) страта имеет наибольшую длину и лучше всего выражена. Увеличение разрядного тока слабо влияет на толщину страт. Повышение давления газа приводит к уменьшению толщины страт. Чем больший порядковый номер страты (от катодного края положительного столба), тем меньше ее толщина.

Получено, что стратификация положительного столба хорошо подчиняется законам подобия. Кривые погасания и области существования страт, измеренные для обеих разрядных трубок и построенные в масштабе  $U_{ext}(pL)$ , практически совпадают. Приведенные толщины страт  $d/R$  (отношение толщины страт  $d$  к радиусу трубки  $R$ ), измеренные в различных трубках, хорошо согласуются друг с другом при построении их в зависимости от произведения давления газа и радиуса трубки  $pR$ .

Показано, что приведенные толщины страт хорошо описываются законом Гольдштейна-Венера  $d/R = C/(pR)^m$ , при этом в диапазоне низких значений  $pR \leq 1$  толщина страт медленно уменьшается с ростом давления газа и  $C = 1,17$ ,  $m = 0,17$ , а при более высоких

$pR$  константы становятся равными  $C = 1$  и  $m = 1,7$ , а увеличение давления газа приводит к резкому сужению и расплыванию страт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Electronics Radiophysics/Ed. Kaptsov N.A. – M.: Moscow University Publishing, 1960. – P. 470-471.
2. Raizer Y.P. Gas Discharge Physics. – Berlin: Springer, 1991. – 450 p.
3. Granovsky V.L. Electric current in gases. – M.: Nauka, 1971. – 490 p.
4. Francis G. The glow discharge at low pressure. (Gas discharge 2)/Ed. by Flugge S.//Encyclopedia of Physic. – 1956. – Vol. 22. – P. 53-208.
5. Garscadden A. Ionization Waves in Glow Discharges. (Electrical Discharges)/Ed. Hirsh M.N. and Oskam H.J.//Gaseous Electronics. – 1978. – Vol. 1. – P. 19-64.
6. Pfau S., Rutscher A., Wojaczek K. Das Дhnlichkeitsgesetz for quasineutrale, anisotherme Entladungssдulen//Beitrag Plasmaphys. – 1969. – Vol. 9, No. 4. – P. 333-358.
7. Nedospasov A.V. Striations//Physics-Uspekhi. – 1968. – Vol. 94, No. 3. – P. 439-462.
8. Pekarek L. Ionization waves (striations) in the discharge plasma//Physics-Uspekhi. – 1968. – Vol. 94, No. 3. – C. 463-500.
9. Golubovsky Y.B., Kudryavtsev A.A., Nekuchaev V.O., Porokhova I.A., Tsendin L.D. Kinetics of electrons in a nonequilibrium gas discharge plasma. – SPb: St. Petersburg University Publishing. – 2004. – 248 p.
10. Venzke D. Messungen an der geschichteten Niederdruck-Entladung in Stickstoff//Beitrag Plasmaphys. – 1971. – Vol. 11, No. 2. – P. 141-148.
11. Laska L., Exner V.L. Ionization Waves in Nitrogen//Czech. J. Phys. B – 1971. – Vol. 21, No. 2. – P. 126-147.
12. Klyarfeld B.N. Formation of striations in a gas discharge//Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1952. – Vol. 22, No. 1. – P. 66-77.
13. Zaitsev A.A. Oscillatory modes and moving layers in the discharge//Reports of USSR Academy of Sciences. – 1952. – Vol. 84, No. 1. – P. 41-44.
14. Coulter J.R.M., Armstrong N.H.K., Emeleus K.G. Moving Striations and Anode Spots in Neon//Proc. Phys. Soc. – 1960. – Vol. 77, No. 2. – P. 476-482.
15. Sato M. On the critical current of ionisation waves in gas discharges//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1982. – Vol. 15, No. 7. – P. 1181-1185.
16. Amemiya H. Characteristics of striations of He and Ne plasmas in small-diameter discharge tubes//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1984. – Vol. 17, No. 12. – P. 2387-2398.
17. Golubovskii Yu.B., Kozakov R.V., Wilke C., Behnke J. and Nekutchayev V.O. Oscillations of the positive column plasma due to ionization wave propagation and two-dimensional structure of striations//Plasma Sources Sci. Technol. – 2004. – Vol. 13, No. 1. – P. 135-142.
18. Dinklage A., Bruhn B., Testrich H., Wilke C. Hysteresis of ionization waves//Physics of Plasmas. – 2008. – Vol. 15, No. 6. – P. 063502.
19. Golubovskii Yu.B., Skoblo A. Yu., Wilke C., Kozakov R.V. and Nekuchaev V.O. Peculiarities of the resonant structure of the electron distribution function in S-, P and R-striations//Plasma Sources Sci. Technol. – 2009. – Vol. 18, No. 4. – P. 045022.
20. Kagan Y.M., Mitrofanov N.K. The energy spectrum of the electrons in a layered column of a glow discharge in hydrogen//Technical Physics. – 1971. – Vol. 41, No. 10. – P. 2065-2072.
21. Mierdel J.//In: Handbuch der Experimental physik. – 1923. – Vol. Bd. 13. – P. 313.
22. Ruzicka T. The connection between moving and standing striations in a d.c. glow discharge in Ne//Czech. J. Phys. Ser. B. – 1968. – Vol. 18, No. 7. – P. 928-936.
23. Twiddy N. D. Electron Energy Distributions in Plasmas. III. The Cathode Regions in Helium, Neon and Argon//Proc Roy. Soc. Ser. A. – 1961. – Vol. 262, No. 1310. – P. 379-394.
24. Twiddy N.D. Electron Energy Distributions in Plasmas. V.A Search for Evidence of a High Anomalous Rate of Energy Exchange between the Electrons of a Low-Pressure Discharge//Proc Roy. Soc. Ser. A. – 1963. – Vol. 275, No. 1362. – P. 338-356.
25. Wehner F. Schichtabstand und Schichtpotentialdifferenz in der positiven Glimmentladung//Annalen der Physik. – 1910. – Vol. 337, No. 6. – P. 49-85.
26. Zaitsev A.A., Miskinova N.A. On the moving and stationary striations in Ne and Ne-H<sub>2</sub>//Radiotekhnika i elektronika. – 1967. – Vol. 12, No. 7. – P. 1318-1320.
27. Lee D.A., Garscadden A. Standing Striations as Solutions of the Pekarek Equation//Phys. Fluids. – 1972. – Vol. 15, No. 10. – P. 1826-1830.

#### LITERATURA

1. Electronics Radiophysics/Ed. Kaptsov N.A. – M.: Moscow University Publishing, 1960. – P. 470-471.

2. Raizer Y.P. Gas Discharge Physics. – Berlin: Springer, 1991. – 450 p.
3. Granovsky V.L. Electric current in gases. – M.: Nauka, 1971. – 490 p.
4. Francis G. The glow discharge at low pressure. (Gas discharge 2)/Ed. by Flugge S.//Encyclopedia of Physic. – 1956. – Vol. 22. – P. 53-208.
5. Garscadden A. Ionization Waves in Glow Discharges. (Electrical Discharges)/Ed. Hirsh M.N. and Oskam H.J.//Gaseous Electronics. – 1978. – Vol. 1. – P. 19-64.
6. Pfau S., Rutscher A., Wojaczek K. Das Dhnlichkeitsgesetz for quasineutrale, anisotherme Entladungssdulen//Beitrage Plasmaphys. – 1969. – Vol. 9, No. 4. – P. 333-358.
7. Nedospasov A.V. Striations//Physics-Uspekhi. – 1968. – Vol. 94, No. 3. – P. 439-462.
8. Pekarek L. Ionization waves (striations) in the discharge plasma//Physics-Uspekhi. – 1968. – Vol. 94, No. 3. – S. 463-500.
9. Golubovsky Y.B., Kudryavtsev A.A., Nekuchaev V.O., Porokhova I.A., Tsendin L.D. Kinetics of electrons in a nonequilibrium gas discharge plasma. – SPb: St. Petersburg University Publishing. – 2004. – 248 p.
10. Venzke D. Messungen an der geschichteten Niederdruck-Entladung in Stickstoff//Beitrage Plasmaphys.– 1971.– Vol.11, No. 2.– P. 141-148.
11. Laska L., Exner V.L. Ionization Waves in Nitrogen//Czech. J. Phys. B – 1971. – Vol. 21, No. 2. – P. 126-147.
12. Klyarfeld B.N. Formation of striations in a gas discharge//Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1952. – Vol. 22, No. 1. – P. 66-77.
13. Zaitsev A.A. Oscillatory modes and moving layers in the discharge//Reports of USSR Academy of Sciences. – 1952. – Vol. 84, No. 1. – P. 41-44.
14. Coulter J.R.M., Armstrong N.H.K., Emeleus K.G. Moving Striations and Anode Spots in Neon//Proc. Phys. Soc. – 1960. – Vol. 77, No. 2. – P. 476-482.
15. Sato M. On the critical current of ionisation waves in gas discharges//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1982. – Vol. 15, No. 7. – R. 1181-1185.
16. Amemiya H. Characteristics of striations of He and Ne plasmas in small-diameter discharge tubes//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1984. – Vol. 17, No. 12. – P. 2387-2398.
17. Golubovskii Yu.B., Kozakov R.V., Wilke C., Behnke J. and Nekutchayev V.O. Oscillations of the positive column plasma due to ionization wave propagation and two-dimensional structure of striations//Plasma Sources Sci. Technol. – 2004. – Vol. 13, No. 1. – P. 135-142.
18. Dinklage A., Bruhn B., Testrich H., Wilke C. Hysteresis of ionization waves//Physics of Plasmas. – 2008. – Vol.15, No. 6. – P. 063502.
19. Golubovskii Yu.B., Skoblo A. Yu., Wilke C., Kozakov R.V. and Nekuchaev V.O. Peculiarities of the resonant structure of the electron distribution function in S-, P and R-striations//Plasma Sources Sci. Technol. – 2009. – Vol. 18, No. 4. – P. 045022.
20. Kagan Y.M., Mitrofanov N.K. The energy spectrum of the electrons in a layered column of a glow discharge in hydrogen//Technical Physics. – 1971. – Vol. 41, No. 10. – P. 2065-2072.
21. Mierdel J.//In: Handbuch der Experimental physik. – 1923. – Vol. Bd. 13. – R. 313.
22. Ruzicka T. The connection between moving and standing striations in a d.c. glow discharge in Ne//Czech. J. Phys. Ser. V. – 1968. – Vol. 18, No. 7. – P. 928-936.
23. Twiddu N. D. Electron Energy Distributions in Plasmas. III. The Cathode Regions in Helium, Neon and Argon//Proc Roy. Soc. Ser. A. – 1961. – Vol. 262, No. 1310. – P. 379-394.
24. Twiddu N.D. Electron Energy Distributions in Plasmas. V.A Search for Evidence of a High Anomalous Rate of Energy Exchange between the Electrons of a Low-Pressure Discharge//Proc Roy. Soc. Ser. A. – 1963. – Vol. 275, No. 1362. – P. 338-356.
25. Wehner F. Schichtabstand und Schichtpotentialdifferenz in der positiven Glimmentladung//Annalen der Physik. – 1910. – Vol. 337, No. 6. – P. 49-85.
26. Zaitsev A.A., Miskinova N.A. On the moving and stationary striations in Ne and Ne-H<sub>2</sub>//Radiotekhnika i elektronika. – 1967. – Vol. 12, No. 7. – P. 1318-1320.
27. Lee D.A., Garscadden A. Standing Striations as Solutions of the Pekarek Equation//Phys. Fluids. – 1972. – Vol. 15, No. 10. – P. 1826-1830.