

УДК 537.527

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РАЗРЯД В ГЕЛИИ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛЕ

А. З. Эфендиев, А. А. Аливердиев

Описаны различные формы самостоятельных разрядов, возникающие в гелии при высоких давлениях (порядка 1—5 атм), в зависимости от конфигурации электродов, давления, напряжения, прилагаемого к разрядному промежутку, и силы тока в цепи.

В работе [1] показано, что в однородном поле при облучении газового промежутка импульсом света «конденсированной» искры из-за локального искажения поля у катода в гелии возникает многоканальный установившийся разряд, горящий в форме параллельных токовых каналов (кистей) при напряжениях горения, меньших статического пробивного напряжения.

Создавая искусственное искажение электрического поля между плоскопараллельными электродами, можно подобрать такие условия, что при постепенном повышении напряжения на разрядном промежутке каналы возникают последовательно с каждого острия без внешнего облучения и, в конечном итоге, в промежутке возникает столько каналов, сколько создано искусственных неоднородностей на катоде [2, 3].

В данной работе приведены результаты по изучению вольтамперных и временных характеристик разряда, распределения потенциала вдоль оси от острия до анода. Описаны различные формы разрядов, возникающих в зависимости от конфигурации электродов, давления, напряжения, прилагаемого к промежутку, и силы тока в цепи, также приведено возможное объяснение механизмов возникновения и горения различных форм многоканального разряда.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Влияние интенсивного облучения на возникновение разряда изучалось по методике исследования облученных промежутков в режиме недо-напряжения [1]. Облучение в период эксперимента оставалось постоянным (емкость подсвечивающего промежутка, находящегося на расстоянии 6 см от испытуемого промежутка, составляла 0,25 мкФ, напряжение на подсвечивающем промежутке — 5 кВ). Исследование временных характеристик велось с помощью осциллографа системы И. В. Стекольниковой. За время формирования кисти бралось время, которое проходило от момента облучения промежутка до начала резкого спада напряжения.

Зависимость распределения потенциала от длины промежутка снижалась компенсационным методом цилиндрическим зондом, изготовленным из нихрома, диаметром 0,2 мм.

Напряжения измерялись киловольтметрами типа С-95 и С-96, а сила тока — микроамперметром М109.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводились в технически чистом гелии. Давление P в условиях эксперимента изменялось в пределах 1—4 атм. Длина испытуемого промежутка d между концами острий и анодом изменялась до 15 мм.

Наши исследования показали, что условия возникновения и горения разряда практически не зависят как от материала катода, так и от материала острий, а зависят при данных P и d от формы острий, их числа и расположения.

Приводимые ниже экспериментальные данные соответствуют случаям, когда в качестве катода употреблялись следующие электроды: 1) стальной электрод диаметром 40 мм, в центре которого было впрессовано острие из нержавеющей стали высотой 2 мм и с углом при вершине 20°; 2) стальной электрод диаметром 80 мм, в который по концентрическим окружностям (расстояние между окружностями 5 мм) высотой 1,5 мм через 10° были впрессованы 209 бронзовых острия диаметром 0,8 мм с радиусом при вершине 0,1 мм. Плоские аноды соответственно имели диаметры 40 и 80 мм.

При установлении в центре катода одного острия разряд возникает в форме одного канала — кисти. Отличие данного разряда от коронного заключается в том, что кисть не имеет внешней (транспортной, темной) области, а замыкает полностью разрядный промежуток, так что условие возникновения кисти, когда в центре установлено острие, имеет вид

$$\gamma \exp \left(\int_r^a \alpha(x) dx \right) = 1, \text{ где } r \text{ — радиус конца острия, } \alpha \text{ — первый коэффициент Таунсенда с поправкой на неоднородность поля, } \gamma \text{ — третий коэффициент Таунсенда.}$$

Пределы интегрирования берутся не до расстояния, на котором коэффициент α имеет очень малое значение, как это имеет место в коронном разряде, а до конца промежутка.

Экспериментальный факт, что условия возникновения и горения многоканального разряда зависят от геометрической формы острий, их числа и расположения, обусловлен, как и в случае коронного разряда, локализацией пространственных зарядов у острий [4], а независимость условий возникновения разряда от материала, из которого изготовлены острия, свидетельствует о том, что в возникновении разряда, как и во всех видах разрядов высокого давления, большую роль играют процессы, происходящие в самом газе.

Ход вольтамперной характеристики одной кисти (см. рис. 1) аналогичен характеристикам коронного и тлеющего разрядов высокого давления. Минимальные значения напряжений U_T и силы тока I соответствуют значениям, наблюдаемым непосредственно после зажигания разряда, а максимальные — перед искровым пробоем. Следует отметить, что плотность тока в разряде не пропорциональна ни P^2 , как это следует из закона подобия, ни $P^{4/3}$ в соответствии с ра-

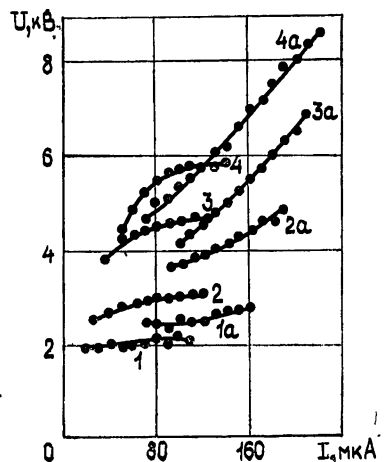


Рис. 1. Вольтамперная характеристика одного разряда.

1, 2, 3, 4 — $d = 10$ мм, P соответственно равно 1, 2, 3, 4 атм; 1а, 2а, 3а, 4а — $d = 15$ мм, $P = 1, 2, 3, 4$ атм.

счетами [5]. Отклонение вольтамперной характеристики от расчетной, возможно, связано с тем, что напряженность поля в разряде падает нелинейно с увеличением расстояния от катода.

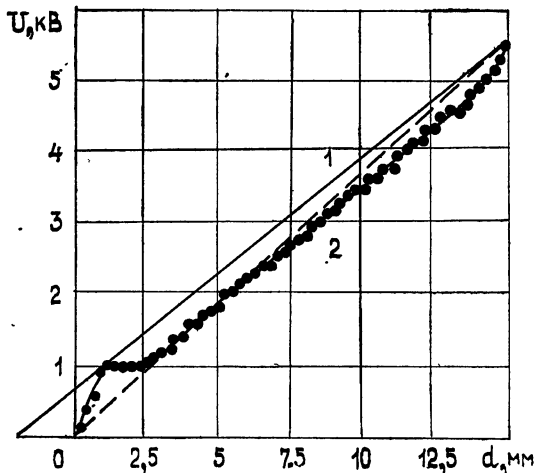


Рис. 2.

а) у электродов имеются области резкого падения потенциала, обусловленные нескомпенсированным пространственным зарядом, б) потенциалы в точках промежутка вне разряда.

Условия возникновения и горения кисти зависят не только от конфигурации электродов, давления и напряжения, но и от облучения испытуемого промежутка. Если к разрядному промежутку приложить U меньше, чем напряжение зажигания разряда и облучить этот промежуток светом «конденсированной» искры, то в промежутке возникнет разряд. С увеличением длины промежутка и давления максимальное снижение напряжения зажигания разряда U_0 под действием одного и того же облучения увеличивается. Значения минимальных U под действием облучения, U_0 без облучения и максимальные значения недонапряжений для различных P и d приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения максимальных недонапряжений для различных давлений и длин промежутков

P , атм	d , мм	U_0 , кВ	U , кВ	$\frac{U_0 - U}{U_0} \cdot 100\%$
4	10	5,8	4,4	24,1
3,5	—	5,1	4	21,6
3	—	4,6	3,7	19,5
2,5	—	3,8	3	21
2	—	3	2,5	16,6
1,5	—	2,3	2,2	4,3
1	—	2	1,9	5
4	15	8,6	4,6	46,5
3,5	—	7,8	4,2	46,1
3	—	6,9	4,1	40,6
2,5	—	6	3,6	40
2	—	4,8	3,6	25
1,5	—	4	3	25
1	—	2,7	2,4	11,1

Влияние облучения на снижение U_0 , по-видимому, объясняется изменением в распределении поля в промежутке, вызванным пространственным зарядом. Вследствие искажения поля интеграл $\int_a^d \alpha(x) dx$ больше, чем интеграл при одном внешнем приложенном поле [6], и условие возникновения разряда удовлетворяется при более низких напряжениях, приложенных к промежутку.

В случае зажженной кисти при высоких значениях U_T в области с большой неоднородностью (по внешнему краю электродов) под действием облучения кратковременно могут возникать тлеющие разряды. При U_T , близких к напряжению возникновения искры под действием облучения, кисть может перейти в искру или совсем потухнуть. Затухание кисти под действием облучения, возможно, связано с уменьшением положительного пространственного заряда у катода из-за усиленной рекомбинации, вызванной увеличением числа фотоэлектронов, возникающих под действием внешнего облучения. Если рекомбинация ионов у катода будет превалировать над ионизацией атомов, то разряд потухнет, в обратном же случае перейдет в искру, что и наблюдается в эксперименте.

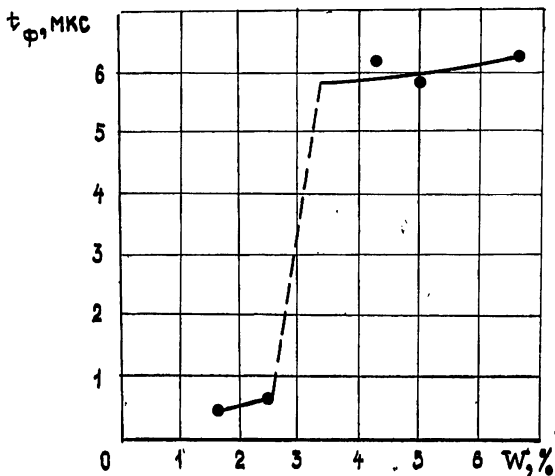


Рис. 3.

Следует отметить, что последующий подсвет (после погасания кисти) приводит или к возникновению кисти, или искры. Время формирования кисти и искры в этом случае — одинаковое. Зависимость времени формирования кисти t_{ϕ} от недонапряжения имеет резкий разрыв, свидетельствующий о смене механизма формирования разряда в зависимости от недонапряжения (см. рис. 3). Например, для $P = 2,5 \text{ атм}$, $d = 15 \text{ мм}$ ($U_0 = 6,1 \text{ кВ}$) при недонапряжении, меньшем 3%, t_{ϕ} имеет порядок 0,3 мкс, а при недонапряжении 3,3% t_{ϕ} увеличивается в 19 раз. Увеличение недонапряжения больше 7% приводит к еще большему увеличению t_{ϕ} , при этом наблюдается большой разброс во временах формирования разряда. В случае больших недонапряжений накопление пространственного заряда происходит в соответствии с механизмом Таунсенда, в то время как при малых недонапряжениях скорость расширения пространственного заряда, по-видимому, увеличивается из-за вливания последовательных групп лавин в область, занятую пространственным зарядом.

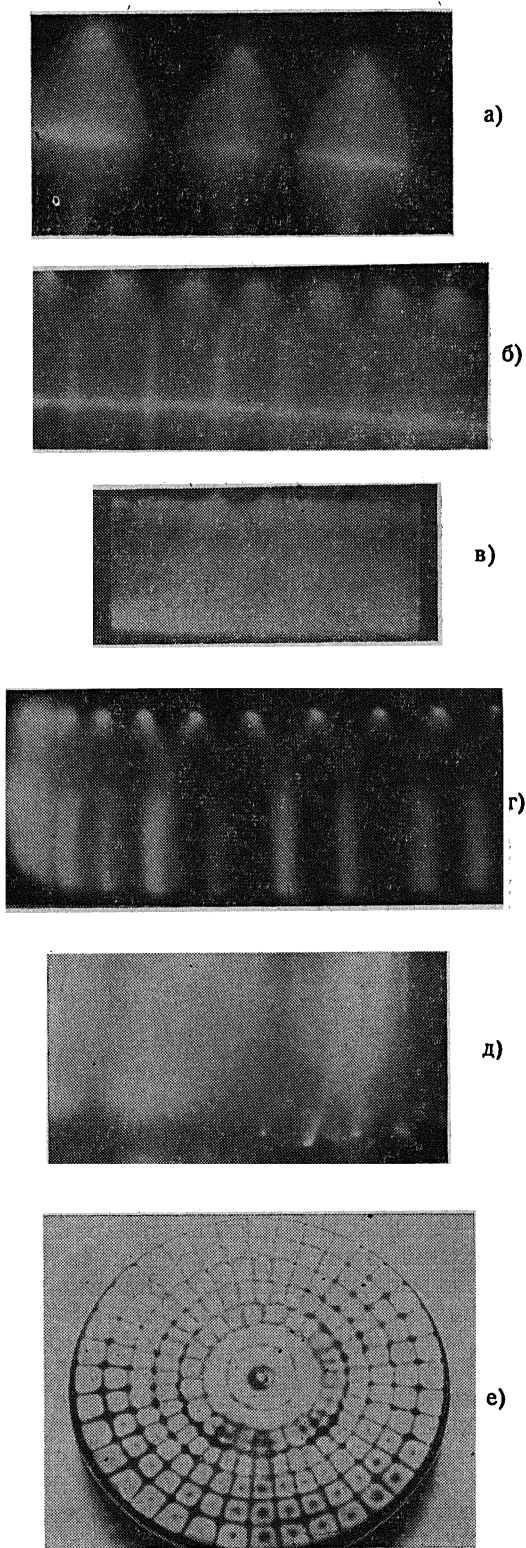


Рис. 4.

При исследовании свойств многоканального разряда, когда на катоде установлено множество острий, нами были обнаружены различные формы разряда (см. рис. 4 а — 4 д). Условия возникновения и горения этих форм разряда зависят от конфигурации электродов, давления газа и длины промежутка. При данной симметрии электродов разряд возникает, когда Pd превышает 1140 мм рт. ст. см ($d > 4$ мм).

В случае, когда условия горения разряда с каждого острия не зависят от условий возникновения и горения рядом горящих кистей ($d < 8$ мм), разряд горит в форме отдельных кистей (см. рис. 4 а). При этом соблюдается, как и в многоканальном разряде в однородном поле [1], пропорциональность силы тока в цепи числу каналов в разряде (см. табл. 2).

С увеличением длины промежутка более 8 мм при Pd , меньших 2280 мм рт. ст. см, разряд также горит в форме отдельных кистей, но из-за того, что рядом расположенные кисти перекрывают друг друга, образуя области повышенной плотности тока (см. рис. 4 б), никакой пропорциональности между силой тока в цепи и числом каналов в разряде не наблюдается.

Первоначальное повышение U_T приводит к возникновению множества кистей, разделенных областями повышенной плотности тока. Так как возникновение каждого канала имеет статистический характер, то горящие кисти равномерно занимают весь объем газоразрядного промежутка, а их катодные пятна равномерно распределяются у катода. При большом количестве горящих кистей (I равен 2—3 мА) совокупность катодных пятен начинает играть роль единого катодного пятна,

вследствие чего разряд перестраивается и горит, как единое целое (см. рис. 4 в). В связи с тем, что совокупное катодное пятно расположено у острей, а не непосредственно у катода, дополнительный теплоотвод, необходимый для стабилизации тлеющего разряда высокого давления, в данном случае не нужен.

Таблица 2

Зависимость между числом каналов в разряде и силой тока

$U_r, \text{кВ}$	$I, \text{мА}$	Число каналов n	$I/n, \text{мкА}$
2,76	0,059	1	59
2,76	0,23	4	57,5
2,8	0,46	8	57,5
2,9	1	17	58,82
2,96	2	33	60,6
2,98	3	51	58,82
3,02	4	68	58,82
3,05	5	84	59,5
3,08	6	101	59,4

Несмотря на то, что разряд горит как единое целое, плотность тока в различных областях разряда неодинаковая. Максимальная плотность тока наблюдается в областях перекрытия каждых соседних четырех разрядов, если бы разряд горел в форме отдельных кистей. Эти плоскости наблюдаются в разряде визуально при рассмотрении разряда под углом и после перестройки разряда. Из-за различия плотности тока в промежутке электроэрозии анода в различных областях неодинаковая. Фотография анода, сфотографированного после того, как разряд горел в течение четырех часов при силе тока, равной 3 мА и $U_r = 3,5 \text{ кВ}$, приведена на рис. 4 е.

В распределении плотности тока, по-видимому, основную роль играют процессы, протекающие на аноде. В области перекрытия рядом горящих кистей плотность тока увеличивается, что приводит к увеличению напряженности поля у анода и, в свою очередь, к увеличению положительного анодного падения потенциала, в результате чего область повышенной плотности тока стягивается.

При Pd , равном 2280 мм рт. ст. см и выше, создаются условия для возникновения контрагированных каналов. Каналы, как правило, возникают по внешнему краю электродов, образуя как бы «белые колеса» (см. рис. 4 г). Из каждого острия по внешней окружности обычно вытекают два канала цилиндрической формы. Каналы с двух соседних острий сливаются в один общий канал, который по расположению совпадает с геометрической плоскостью пересечения двух разрядов, если бы они горели в форме отдельных кистей. Максимальная сила тока в цепи при этих условиях уменьшается до величины порядка 4 мА, в то время как для малых Pd искровой разряд происходит после достижения силы тока в цепи, равной 12 мА. Вольтамперные характеристики для различных P и d приведены на рис. 5 а, б.

Контракция каналов, как в случае тлеющего, так и дугового разряда низкого давления [7], по-видимому, обусловлена увеличением относительной роли ступенчатых процессов, объемной рекомбинации и ударов 2-го рода при увеличении давления. Так как магнитная сила, с которой притягиваются параллельные токи, пропорциональна длинам этих токов, то с увеличением d вероятность слияния двух токов, вытекающих из соседних острий, увеличивается. В связи с этим условия для возникновения

контрагированных каналов зависят не только от давления, но и от длины промежутка.

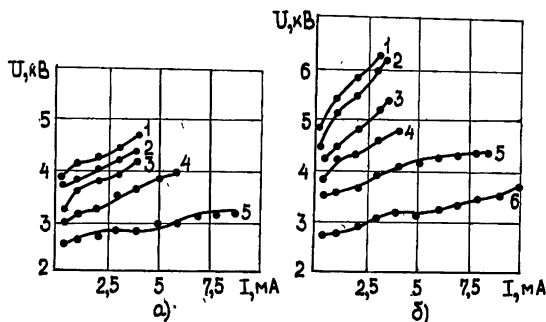


Рис. 5. Вольтамперные характеристики многоканального разряда.

а) $d=10$ мм. Кривые 1—5 соответствуют давлениям:

1—4 атм, 2—3,5 атм, 3—3 атм, 4—2,5 атм, 5—2 атм;

б) $d=15$ мм. Кривые 1—6 соответствуют давлениям:

1—4 атм, 2—3,5 атм, 3—3 атм, 4—2,5 атм, 5—2 атм, 6—1,5 атм.

При U_r , близких к напряжениям, при которых возникает искра, разряд становится нестабильным. В разрядном промежутке возникают тонкие нитевидные каналы — «стримеры», замыкающие промежуток. Ток в цепи при этом колеблется. В случае появления этих каналов пробой промежутка неизбежен без дальнейшего повышения напряжения на промежутке. Фотография таких каналов приведена на рис. 4д. Возникновение «стримеров» при U_r , близких к напряжениям возникновения искры во всех формах разряда, обусловлено образованием анодных пятен, происхождение которых, как и в случае дуги низкого давления [7], возможно, связано с увеличением генерации ионов у анода. При локальном повышении генерации ионов толщина плазмы возрастает. Плазменный нарост вытягивается в сторону катода, что вызывает по его краям снижение анодного падения потенциала. Увеличение локальной плотности тока в области анодного пятна приводит к образованию каналов — «стримеров».

Следует отметить, что в некоторых случаях у одного анодного пятна наблюдается не один, а несколько «стримеров»; при этом каналы могут как пронизывать, так и не пронизывать весь разрядный промежуток. В случае, когда «стримеры» замыкают промежуток, стабилизация разряда обусловлена в зависимости от формы разряда горящими кистями или контрагированными каналами. Однако даже небольшие флуктуации тока в «стримере» приводят к значительному увеличению плотности тока, которая, в свою очередь, приводит к нестабильности разряда и возникновению искры. Так как с увеличением давления вероятность появления анодных пятен увеличивается, то максимальная сила тока многоканального разряда при увеличении P уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. З. Эфендиев, Сборник научных сообщений, Физика, вып. 1, Даггосуниверситет, Махачкала, 1968, стр. 3
2. А. З. Эфендиев, Б. З. Мехтиев, М.-Н. Б. Бейбалаев, Сборник научных сообщений, вып. 3, Даггосуниверситет, Махачкала, 1971, стр. 32.
3. А. З. Эфендиев, А. А. Аливердиев, Б. З. Мехтиев, Сборник научных сообщений, вып. 1, Даггосуниверситет, Махачкала, 1974, стр. 130.
4. Дж. Мик, Дж. Крэгс, Электрический пробой в газах, ИЛ, М., 1960.
5. A. Engel, R. Seeliger and M. Steenbeck. Zs. f. Phys., 85, 144 (1933).

6. А. Энгель, Ионизованные газы, изд. Наука, М., 1959.
7. Б. Н. Клярфельд, А. Н. Неретина, ЖТФ, 30, 186 (1960).

Дагестанский государственный университет

Поступила в редакцию
3 июня 1976 г.

MULTI-CHANNEL HELIUM DISCHARGE IN INHOMOGENEOUS FIELD

A. Z. Efendiev, A. A. Altverdiev

Different forms of independent discharges appearing in helium under high pressures (of the order of 1—5 atm) depending on electrode configurations, pressure, voltage applied to the discharge interval and the circuit current are described.
