

## ОБ УСЛОВИЯХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТРИМЕРОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ КОРОНЫ

К. Ф. Куду, В. А. Веймер

Типичная последовательность форм разряда в асимметричном разрядном промежутке в воздухе в лабораторных условиях с увеличением приложенного к электродам постоянного напряжения следующая: (электронные лавины) вспышечные импульсы — предначальные стримеры — непрерывная вспышечная корона — предпробойные стримеры — искровой пробой. Очевидно, здесь предполагают, что положительный потенциал имеет электрод с большой кривизной. Вероятность возникновения и интервалы напряжения существования названных форм разряда зависят от геометрии разрядного промежутка, от давления и влажности воздуха, от наличия примесей посторонних газов в воздухе, а

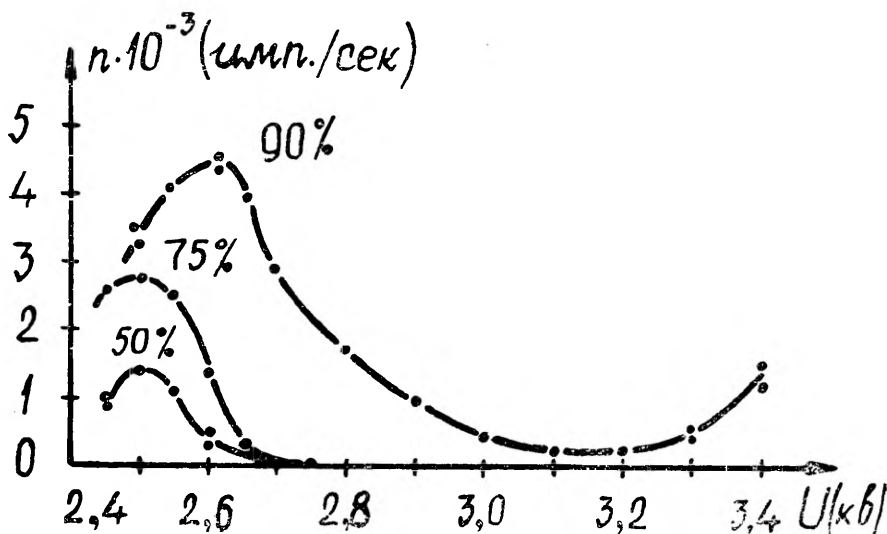


Рис. 1. Зависимость числа стримеров в единицу времени от напряжения при различной относительной влажности воздуха.

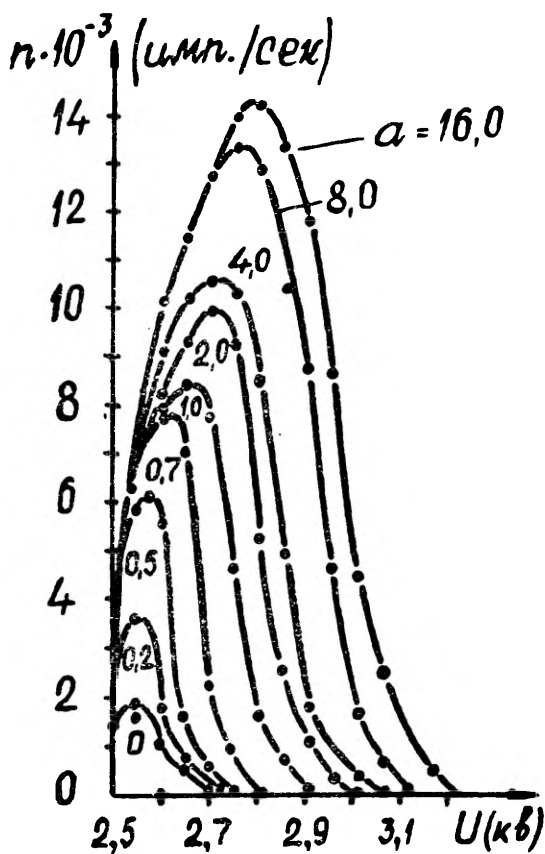


Рис. 2. Зависимость числа стримеров в единицу времени от напряжения при различной концентрации хлора в воздухе, концентрация  $C = a \cdot 10^{-3} \%$ .

также от степени начальной ионизации [1]. На рис. 1 приведена зависимость числа стримеров в единицу времени от напряжения при различной влажности воздуха. На рис. 2 изображена такая же зависимость при разных концентрациях хлора в воздухе [2].

Можно подобрать такую геометрию разрядного промежутка, при которой визуально наблюдаемые вспышечные импульсы отсутствуют, разряд начинается с появления коронных стримеров, величина и частота возникновения которых с увеличением напряжения возрастают, пока они не достигают противостоящего электрода и обуславливают искровой пробой [1, 3]. В случае другой геометрии, при прочих равных условиях, не обязательно возникают предначальные стримеры. С увеличением напряжения вспышечные импульсы заменяются непрерывной вспышечной короной, за которой следуют предпробойные стримеры и пробой.

Если длина разрядного промежутка настолько мала, что предначальные стримеры достигают уже противостоящего электрода,

то возникает пробой. Напряжение, при котором этот пробой — пробой I — наблюдается, соответствует интервалу напряжений возникновения предначальных стримеров. Выше этого интервала напряжений обычно имеет место непрерывная вспышечная корона, за которой при более высоких напряжениях следуют предпробойные стримеры и пробой — пробой II. Надо отметить, что в последнем случае уже первый предпробойный стример может обуславливать пробой II. В зависимости от геометрии разрядного промежутка, интервал напряжений существования непрерывной вспышечной короны может быть весьма узким и даже отсутствовать. Чем однороднее электрическое поле, тем уже интервал напряжений существования непрерывной вспышечной короны. Таким образом, электрический пробой асимметричного разрядного промежутка при положительной полярности на электроде с большей кривизной может иметь место при весьма низких — пороговых — напряжениях коронных импульсов и при напряжениях, значительно превышающих величину этого напряжения. Следовательно, попав в область непрерывной вспышечной короны, можно достичь пробоя двумя способами — либо с увеличением, либо с понижением напряжения. Впервые названные два типа пробоя наблюдал, по-видимому, Улман [4]. Вновь они были обнаружены Сиксна [5], и, по-видимому, независимо от него Хермштейном [6]. Весьма много уделяли этому явлению внимания Богданова и Попков [7, 8] и др. При работе с напряжением высокой частоты подобные эффекты отметил один из авторов данной статьи [1] и Раскэн [9, 10].

Настоящая работа была предпринята для того, чтобы более детально выяснить условия возникновения коронных стримеров, как предначальных, так и предпробойных. Особое внимание было обращено на зависимость частоты возникновения предначальных стримеров от величины начальной ионизации.

### Экспериментальная установка

Исследования проводились в коаксиально-цилиндрическом разрядном промежутке (рис. 3), где коронирующим электродом являлась платиновая проволока с полусферически обработанным концом. Как диаметр проволоки (1), так и диаметр кривизны ее вершины имели величину в 1 мм. Проволока находилась на оси внешнего алюминиевого цилиндра (4) с длиной 450 мм и диаметром 75 мм. Коронирующее острие внутреннего электрода находилось на расстоянии порядка 150 мм от открытого конца внешнего цилиндра. Неоднородность электрического поля вблизи острия можно было изменять перемещением платиновой проволоки внутри посаженного на нее полого шара (2) с отверстием, который был неподвижно прикреплен к изолятору (6) при помо-

щи медной трубки. Диаметр шара 8 мм. Расстояние острия от поверхности шара можно было изменять от 0 до 20 мм. Оно измерялось при помощи микрометрического винта (3). В изоляторе (6) находились каналы, через которые из разрядного промежутка отсасывался воздух с продуктами разряда. Скорость потока воздуха в разрядном промежутке можно было изменять от  $0,25 \div 1,5$  м/сек.

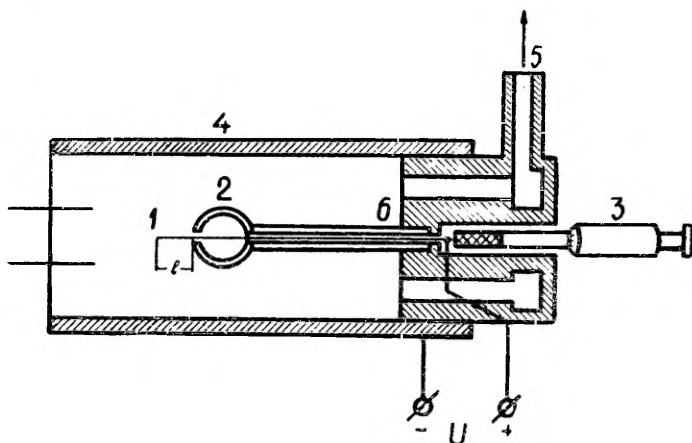


Рис. 3. Разрез разрядного промежутка.

- 1 — Платиновая проволока с закругленным концом  
(l — длина выступающей части проволоки).
- 2 — Полный латунный шар.
- 3 — Микровинт.
- 4 — Внешний полый цилиндр из алюминия.
- 5 — Патрубок для отсоса воздуха.
- 6 — Изолятор.

Разрядный промежуток питался напряжением от источника высокого напряжения ВС-222 фирмы «Tesla». Выходное напряжение последнего было плавно регулируемо в пределах от 0 до 50 кв. Вследствие малого постоянства этого напряжения для повышения точности измерений был сконструирован высоковольтный стабилизатор. Он позволял получить на выходе плавно изменяемое напряжение в пределах  $400 \div 16000$  в при токах нагрузки  $0 \div 1,5$  ма. Напряжение измерялось компенсационным методом при помощи потенциометра ПП-63 и делителя напряжения на сопротивлениях МВСГ (0,03%) Точность измерения напряжения была не хуже 0,1%. Стабильность работы стабилизатора во всем диапазоне токов и напряжений была не меньше 0,025%, пульсация не превышала 100 мв.

Блок-схема стабилизатора приведена на рис. 4. Стабилизатор состоял из управляющих ламп ( $2 \times 6$  С 20 С), усилителя постоян-

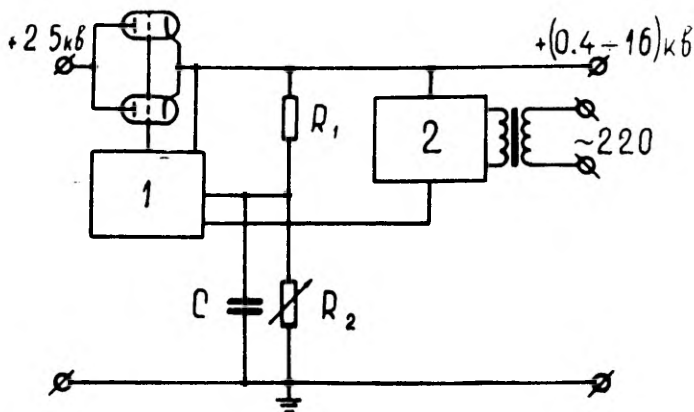


Рис. 4. Принципиальная схема высоковольтного стабилизатора напряжения.

- 1 — Усилитель постоянного тока.  
2 — Источник опорного напряжения.

ного напряжения (1), источника опорного напряжения (2) и высоковольтного делителя напряжения  $R_1R_2$ . Усилитель постоянного напряжения был двухкаскадным с суммарным коэффициентом усиления около 800. Выходное напряжение источника опорного напряжения было около 400 в со стабильностью не хуже 0,01%. Делитель напряжения  $R_1R_2$  позволял изменять выходное напряжение ступенчато и в пределах ступени плавно с точностью установки до 1 вольта. Накал управляющих ламп и напряжение анодного питания источника опорного напряжения подавались через трансформатор специальной конструкции, вторичные обмотки которого находились в герметической плексигласовой коробке и были пропитаны парафином в вакууме.

Число элементарных зарядов в единице объема воздуха непосредственно около открытого конца внешнего цилиндра определялось счетчиком ионов САИ-ТГУ-65М. Начальную ионизацию изменяли  $\beta$ -активным препаратом.

Стримеры подсчитывались счетчиком ПС-10000. Импульсы тока снимались с резистора с сопротивлением в 1 Мом, который был подключен между внешним цилиндром и «землей». С этого же сопротивления снимался импульс тока на вход осциллоскопа С1 — 35. Блок-схема установки приведена на рис. 5.

### Результаты измерений

Определялась зависимость пороговых напряжений предначальных и предпробойных стримеров и непрерывной вспышечной короны при различной геометрии разрядного промежутка, а так-

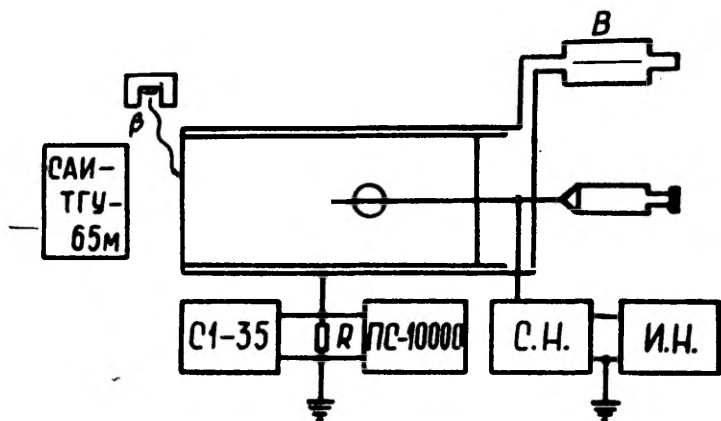


Рис. 5. Блок-схема установки. С1-35 — осциллоскоп для наблюдения формы импульсов тока, снимаемых с сопротивления  $R$ . ПС-10000 — пересчетное устройство, С.Н. — стабилизатор постоянного напряжения, И.Н. — источник высокого напряжения, САИ-ТГУ-65М — счетчик аэроионов,  $\beta$  — радиоактивный препарат, В — вентилятор.

же зависимость числа предначальных и предпробойных стримеров в единицу времени от напряжения между электродами. Соответствующие графики представлены на рис. 6, 7 и 8.

На рис. 6 показана зависимость пороговых напряжений предначальных и предпробойных стримеров, непрерывной вспышечной короны, а также пробоя от степени неоднородности электрического поля, то есть от длины  $l$  выступающей из шара платиновой проволоки. Кривая А соответствует порогу предначальных стримеров, кривая Б — порогу непрерывной вспышечной короны, В — порогу предпробойных стримеров и кривая Г — пробую. Надо отметить, что пороговые напряжения предпробойных стримеров и пробоя имеют сильный разброс, особенно при больших неоднородностях поля. Видно, что при уменьшении  $l$  ширина интервала напряжений существования непрерывной короны сужается. При  $l \leq 0,8$  мм названная форма разряда вообще невозможна. В этом случае интервалу напряжений возникновения предначальных стримеров следует непосредственно интервал возникновения предпробойных стримеров. С уменьшением  $l$  длина и яркость стримеров стали больше.

Зависимость числа стримеров от перенапряжения  $\Delta U$  по отношению к пороговому напряжению предначальных стримеров при разной длине  $l$  острия показана на рис. 7. Цифры у кривых соответствуют вертикальным сечениям на рис. 6. Из рис. 7 особенно хорошо видно, что с уменьшением неоднородности поля интервал

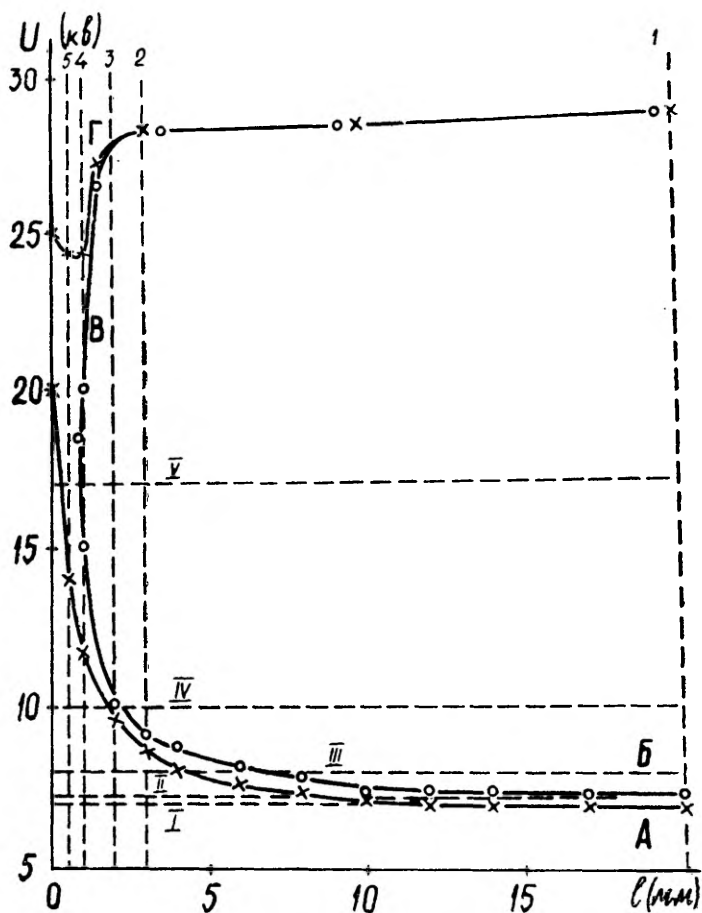


Рис. 6. Зависимость пороговых напряжений предначальных стримеров (А), непрерывной вспышечной короны (Б), предпробойных стримеров (В) и напряжения пробоя (Г) от длины  $l$  выступающей части острия.

напряжений возникновения предначальных стримеров и вероятность их возникновения увеличиваются. В случае кривой 7 область предначальных стримеров различима от области предпробойных стримеров только по минимуму на кривой.

На рис. 8 показана зависимость числа стримеров от неоднородности поля при различных напряжениях на электродах. По оси абсцисс отложено приращение длины острия  $\Delta l$ , начиная от длины, соответствующей порогу предначальных стримеров. Римские цифры у кривых соответствуют горизонтальным сечениям на рис. 6.

Рис. 7. Зависимость числа стримеров в единицу времени от перенапряжения по отношению к пороговому при различной геометрии разрядного промежутка. 1 —  $l=20$  мм, 2 —  $l=3$  мм, 3 —  $l=2$  мм, 4 —  $l=1$  мм, 5 —  $l=0.5$  мм.

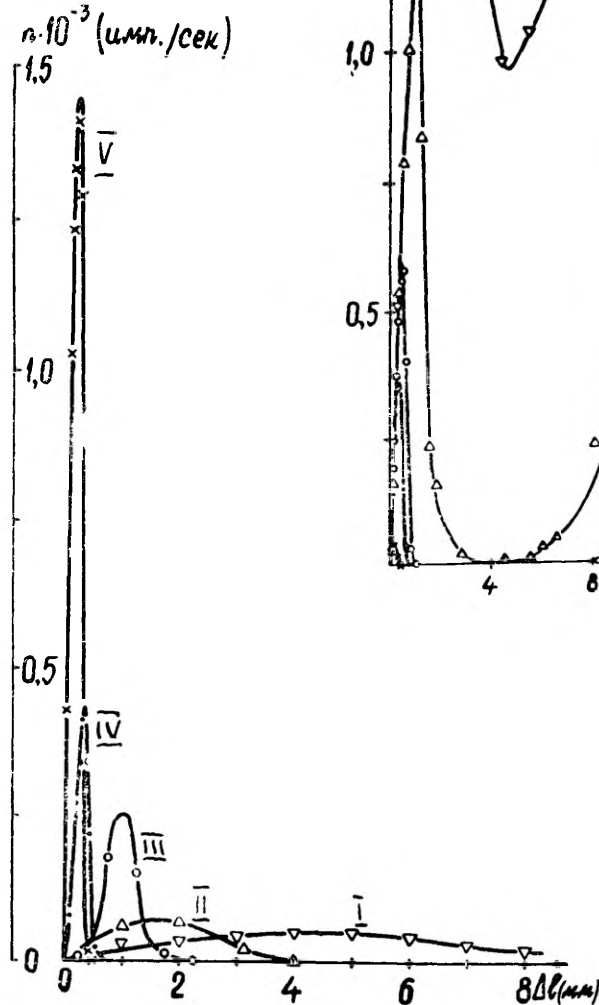
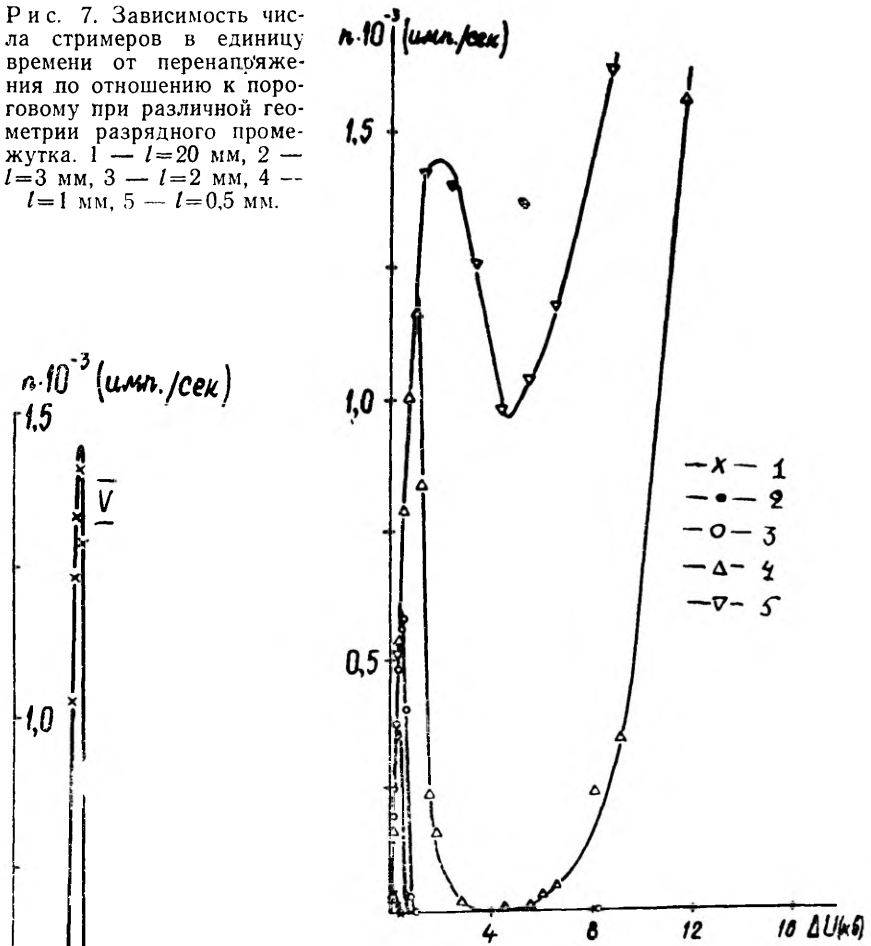
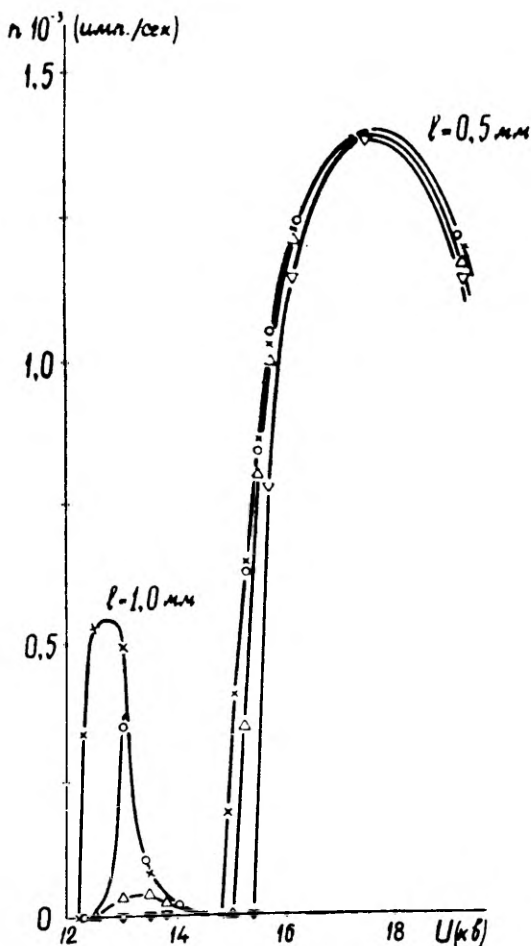


Рис. 8. Зависимость числа стримеров в единицу времени от длины острья, приведенной к пороговой длине при различных напряжениях: I —  $U=7,0$  кв; II —  $U=7,25$  кв; III —  $U=8,0$  кв; IV —  $U=10$  кв; V —  $U=17$  кв.

Рис. 9. Зависимость числа стримеров в единицу времени от напряжения при различных начальных ионизациях воздуха для двух геометрий разрядного промежутка. Число отрицательных ионов было для случая  $x - 0,8 \cdot 10^4 \frac{\text{ионов}}{\text{см}^3}$ ;  $o - 2,5 \cdot 10^4 \frac{\text{ионов}}{\text{см}^3}$ ;  $\Delta - 7,5 \cdot 10^4 \frac{\text{ионов}}{\text{см}^3}$ ;  $\square - 22 \cdot 10^4 \frac{\text{ионов}}{\text{см}^3}$ . Во всех случаях число положительных ионов было примерно на 20% выше.



На рис. 9 приведена зависимость числа предначальных стримеров от приложенного к разрядному промежутку напряжения для двух значений  $l$  при различных начальных ионизациях воздуха. Из рис. 9 видно, что при достаточной неоднородности поля вблизи коронирующего электрода наблюдается очень сильная зависимость частоты возникновения предначальных стримеров от концентрации ионов. При больших значениях  $l$  (т. е. при большей неоднородности) эта зависимость была еще сильнее — уже незначительное увеличение концентрации ионов приводило к прекращению возникновения предначальных стримеров. Частота возникновения вспыхивающих импульсов с увеличением концентрации ионов возрастала. Мы имеем в данном случае переход вспыхивающих импульсов с увеличением напряжения в непрерывную

вспышечную корону без существования промежуточного интервала напряжений возникновения предначальных стримеров.

При уменьшении степени неоднородности поля вблизи острия начальная ионизация не так сильно влияет на частоту возникновения предначальных стримеров, хотя виден весьма значительный сдвиг порога возникновения предначальных стримеров в сторону более высоких напряжений.

Все приведенные зависимости были сняты при скорости потока воздуха в разрядном промежутке 0,5 м/сек и при относительной влажности, равной примерно 60%.

Была замечена весьма сильная зависимость максимальной частоты возникновения предначальных стримеров от скорости потока воздуха через разрядный промежуток.

### Выводы

Из вышеприведенного можно заключить следующее.

1. Пороговое напряжение коронного разряда зависит от длины острия, примерно так же, как в работе [10].

Ширина интервалов напряжений возникновения разных форм разряда зависит весьма сильно от степени неоднородности электрического поля вблизи острия. Чем однороднее поле, тем шире интервал напряжений возникновения предначальных стримеров и уже область существования непрерывной вспышечной короны. Начиная с определенной степени неоднородности в сторону более однородных полей непрерывная вспышечная корона не возникает, и за областью возникновения предначальных стримеров с увеличением напряжения следует непосредственно область возникновения предпробойных стримеров.

2. Из области возникновения вспышечных импульсов можно перейти в область существования непрерывной вспышечной короны сквозь область возникновения предначальных стримеров двумя способами — увеличивая при определенной длине острия приложенное к разрядному промежутку напряжение или изменяя при фиксированном напряжении расположение вершины острия относительно надетого на острие шара.

3. Вероятность возникновения предначальных стримеров в области их существования больше при более однородных полях. В это же время больше их длина и яркость.

4. Вероятность возникновения предначальных стримеров зависит сильно от величины начальной ионизации. Эта зависимость тем сильнее, чем неоднороднее поле вблизи острия. При  $l > 5$  мм уже двух-трехкратное увеличение начальной ионизации над обычной вызывало полное подавление стримеров.

В случае более однородных полей порог предначальных стримеров с увеличением начальной ионизации повышается. Одновре-

менно наблюдается сдвиг максимальной частоты возникновения предначальных стримеров в сторону более высоких напряжений.

5. Вероятность возникновения предначальных стримеров зависит от скорости потока воздуха.

В настоящее время отсутствует единая точка зрения относительно механизма подавления предначальных стримеров во всех вышеизложенных случаях [11]. До появления работ Хермштейна причиной этого считали пространственный заряд положительных ионов от предыдущих стримеров и вспыхивающих импульсов, понижающий напряженность поля вблизи острия настолько, что возможно образование только вспыхивающих импульсов [12]. Хермштейн предлагает в качестве такого фактора пространственный заряд отрицательных ионов [6]. Следует, однако, отметить, что прямого экспериментального подтверждения не имеет пока ни первое, ни второе предположение.

Активное участие принимали при выполнении представленной работы студенты физического отделения ТГУ Х. Тайм и А. Райдару.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Куду, К. Ф., О начальных стадиях разряда с острия в воздухе. Тарту, 1960.
2. Vaska, M., Positiivse koroona striimerid haloidide indikaatorina. Дипломная работа, Тарту, ТГУ, 1960.
3. Богданова, Н. В., Попков, В. И., Some Characteristics of Flare Discharge in Atmospheric Air. VIII Int. Conference on Phenomena in Ionized Gases, Vienna, 1967, p. 214.
4. Uhlman, E., Der elektrische Durchschlag von Luft zwischen konzentrischen Zylindern. Arch. f. Elektrotechn., 1929, 23.
5. Siksna, R., Two different breakdowns between a positive electrode with small curvature and a plane. Ark. Fys., 1955, 9. nr. 6, 77.
6. Hermstein, W., Die Stromfaden-Entladung und ihr Übergang in das Glimmen und die Entwicklung der positiven Vorentladungen in Luft zum Durchschlag. Arch. f. Elektrotechn., 1960, 45, 209, 279.
7. Богданова Н. В., К вопросу о влиянии предразрядных явлений на пробивание напряжения разрядных промежутков. «Пробой диэлектриков и полупроводников». Сб. докладов IV межвузовской конференции по пробую диэлектриков и полупроводников, «Энергия», 1964, 49.
8. Богданова Н. В., Попков В. И., Вопросы управления формой коронного разряда на электроде и пробивным напряжением воздушного промежутка. Изв. АН СССР Энергетика и транспорт, 1966, 3, 82.
9. Rasquin, W., Das Durchschlagverhalten von Luft unter der Einwirkung eines inhomogenen elektrischen Gleichfeldes mit überlagertem Wechselfeld. Zeit. ang. Phys., 1965, 19, 5, S. 460.
10. Орлов Н. Н., К вопросу о коронном разряде в промежутке острие-плоскость. Изв. ВУЗ-ов.
11. Loeb, L. B., Electrical Coronas, 1965.
12. Amin, M. R., Fast Time Analysis of Intermittent Point-to-Plane Corona in Air. J. Appl. Phys., 1954, 25, 210, 358.

Поступила 5/VIII 1968 г.

# POSITIIVSE KOROONA ILMUMISTINGIMUSTEST

K. Kudu, V. Veimer

Resümee

Koaksiaalsilindrilises lahendusvahemikus uuriti siseelektroodi nihutatava metallkera mõju koroona algstriimerite, pideva koroona, läbilöögieelsete striimerite lävepingele, lahendusvahemiku läbilöögipingele ja striimerite ilmutissagedusele. Kasutati kohapeal valmistatud kõrge stabiilsusega pingeallikat.

Leiti, et positiivse koroona lävepinge sõltub kera asendist siseelektroodi koroneeriva tipu suhtes nagu töös [9]. Algstriimerite ja pideva koroona pingete intervall sõltub tugevasti kera asendist. Mida lähemal koroneeriva elektroodi tipule asetseb kera, s. t. mida homogeensem on elektriväli, seda laiem on algstriimerite pingete intervall ja kitsam pingete intervall pideva koroona esinemiseks. Alates kera teatud asendist, ei ole pidev koroona võimalik ning algstriimeritele järgnevad vahetult läbilöögile eelnevad striimerid.

Koroonapursete piirkonnast võib sattuda pideva koroona piirkonda läbi algstriimerite esinemispiirkonna kahele viisil: suurendades kera antud asendi juures elektroodidevahelist pinget või muutes antud pingel kera asendit koroneerival elektroodil.

Elektrivälja homogeensuse suurendamine toob kaasa algstriimerite ilmutise tõenäosuse suurenemise. Tugevasti sõltub algstriimerite ilmutise tõenäosus algionisatsioonist: mida kaugemal on kera elektroodi tipust, seda tugevam on algionisatsiooni mõju. Alates kera teatud asendist muudab algionisatsiooni kahe-kolmekordne suurenemine üle loomuliku taseme algstriimerite ilmutise tõenäosuse nulliks. Enamhomogeensete elektriväljade juures tõstis algionisatsiooni suurenemine algstriimerite lävepinget. Samal ajal nihkus nende ilmutissageduse maksimum kõrgemate pingete suunas.

## ON CONDITIONS OF THE POSITIVE CORONA STREAMER APPEARANCE

K. Kudu, V. Veimer

Summary

The authors examined the effect of a metal sphere inserted into the internal electrode of a coaxial-cylinder discharge gap (Fig. 1) on the threshold potential of pre-onset streamers, burst-pulse steady corona, pre-breakdown streamers, breakdown of the discharge gap and on the number of streamers per second.

The threshold potential of positive corona was found to depend on the distance between the tip of the point electrode and the sphere

as discussed in [9]. The voltage intervals where pre-onset streamers or steady corona occur were also found to be considerably affected by the position of the sphere. When the sphere was nearer the tip of the point electrode, the voltage interval for pre-onset streamers became wider and that for steady corona narrower. If the distance between the electrode tip and the sphere was too small, there was no steady corona between pre-onset and pre-break-down streamers.

From the region of burst pulses it was possible to get into the region of steady corona not only by increasing the voltage between the electrodes but also, at a constant voltage, by increasing the distance between the tip of the point electrode and the sphere.

If the sphere was closer to the electrode tip, the probability for pre-onset streamer appearance became greater. The probability of pre-onset streamer appearance was also affected by the intensity of ionisation in the discharge gap: the farther the sphere was situated from the electrode tip the stronger was the effect of ionisation. In some positions of the sphere when the increase of the ionisation rate was twice or thrice the natural value, the probability of streamer appearance was reduced to zero.

If the sphere was closer to the electrode tip, the increase of the ionisation rate raised the threshold potential of the pre-onset streamers. At the same time, the maximum number of streamers per second was shifted to higher voltages.