

## Ионная эмиссия во влажном воздухе

© В.И. Баткин

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия  
e-mail: vbatkin@lnsk.ru

(Поступило в Редакцию 6 июня 2007 г.)

Описан электрический разряд с характерными токами 1 рА, возникающий при влажности воздуха > 60% и напряженности электрического поля > 10 кВ/см. Экспериментальные данные показывают, что имеет место не коронный разряд, а разряд в результате ионной эмиссии с влажной поверхности. Эмиссия приводит к падению потенциала изолированного электрода по закону  $U(t) \sim e^{-k\sqrt{t}}$ . Для измерения статического электрического поля применяются неподвижный коллектор и вибрирующая экранирующая сетка.

PACS: 52.80.Tn, 01.50.Pa, 84.70.+p

### Введение

Электрическая прочность изоляторов — тема, которая сохраняет актуальность, пока существует высоковольтная техника и ее приложения. Главная проблема высоковольтной изоляции — влажность воздуха. Обычно ее связывают с возрастающими утечками заряда по поверхности изоляторов. Неоднородная поверхностная проводимость приводит к локальному росту электрического поля и инициации разряда. Публикации на эту тему не перестают появляться и в последнее время [1–3].

Результаты настоящей работы показывают, что поверхностная проводимость — не единственный путь передачи заряда: при повышенной влажности воздуха значительное его количество уносится с поверхности электрода в воздушную среду. В первой серии опытов наблюдалось электрическое поле тщательно изолированного электрода. Убывание этого поля является наглядным свидетельством ухода заряда. Во второй серии проводились прямые измерения тока через воздушный промежуток при регулируемом напряжении электрода.

### Измерения потенциала изолированного электрода

Схема первой серии эксперимента показана на рис. 1. Электрод *I* заряжался до напряжения около 10 кВ прикосновением заряженного тела. В качестве электрода использовался медный стержень диаметром 5 мм и длиной 25 см либо аналогичный стержень из стекла или кварца. Кварцевый стержень не подвергался поверхностной обработке и при влажности воздуха > 60% обладал заметной проводимостью. Электрод крепился горизонтально на тефлоновом изоляторе *2* длиной 16 см на расстоянии 30 мм от заземленной плоскости *3*. На его противоположный конец надевался тефлоновый колпачок. Потенциал электрода определялся дистанционно по создаваемому им электрическому полю при помощи электромеханического датчика *4*. Датчик содержал кол-

лектор, регистрирующий ток смещения и вибрирующую заземленную сетку. При измерении расстояния между сеткой и коллектором меняется доля потока внешнего электрического поля, приходящего между проволоками сетки на коллектор, и создается ток смещения, пропорциональный напряженности внешнего поля. Частота вибрации  $F = 200$  Hz. Сигнал *A* тока смещения усиливался, оцифровывался, перемножался с оцифрованным синусоидальным сигналом *B* от привода и интегрировался в течение времени, кратного периоду вибрации. Такая обработка сигнала проводилась в реальном времени и давала показания статического электрического поля. Использованный в настоящей работе метод измерения электрического поля малочувствителен к токам утечки входа усилителя. Если для обычного емкостного датчика [4] потребовались особые меры, чтобы увеличить его время саморазряда до 2000 с, то в датчике с вибрирующей сеткой было достаточно истокового повторителя на транзисторе КП307Ж с шунтирующим сопротивлением в цепи затвора 200 МΩ. Модуляция электрического поля редкой сеткой позволяет минимизировать помехи, вызванные неоднородностью материала модулятора. Реализованная схема обработки сигнала ограничивает

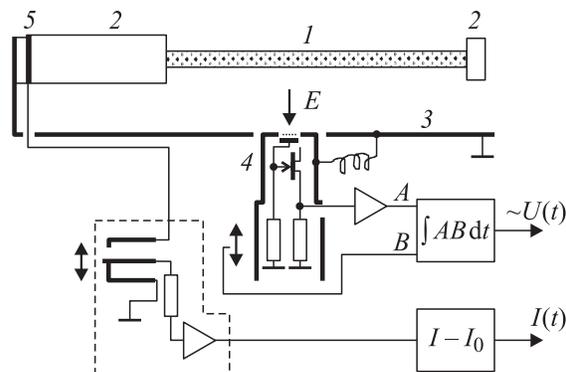


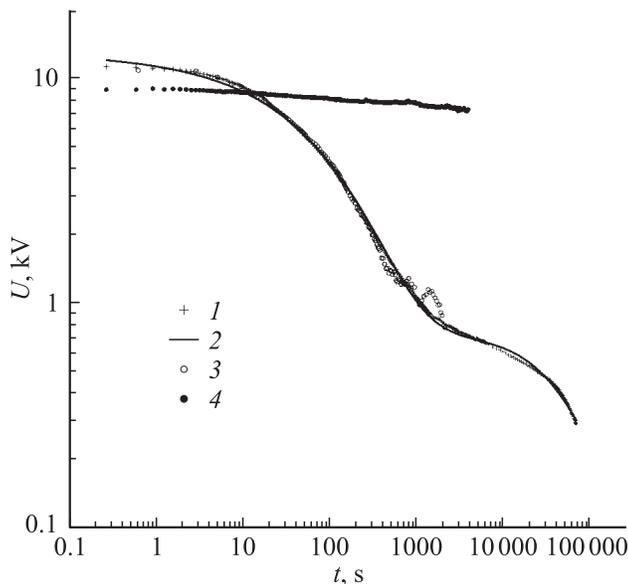
Рис. 1. Экспериментальная установка, *I* — электрод, *2* — изолятор, *3* — заземленная пластина, *4* — датчик электрического поля, *5* — электрод для измерения тока утечки.

быстродействие датчика частотой вибрации. При более сложной обработке временное разрешение может быть улучшено. Искажение показаний, вызванное попаданием в датчик ионного тока  $\frac{\delta U}{U} \approx \frac{1}{\tau F}$ , незначительно при наблюдаемых временах разряда  $\tau > 1$  с и частоте вибрации  $F = 200$  Hz. Ток утечки с основания изолятора 5 контролировался электрометрическим усилителем. Для устранения дрейфа нуля определялась разность сигналов тока с основания изолятора и корпуса.

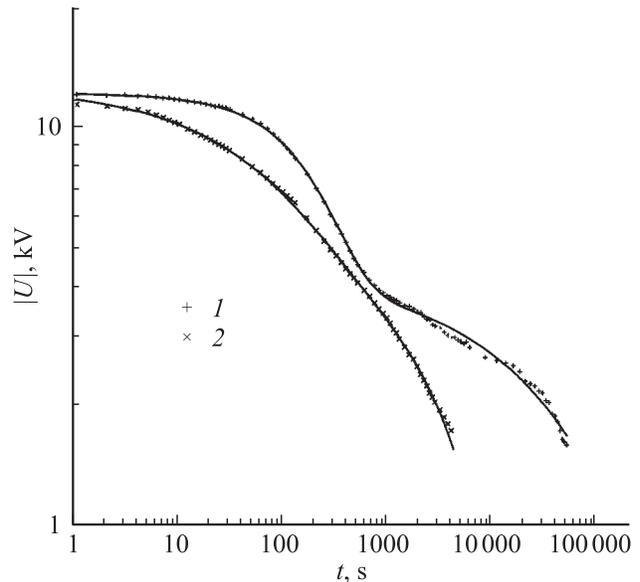
На рис. 2 представлены характерные результаты наблюдения разряда электрода в воздухе. График потенциала  $U(t)$  совпадает с нормированным графиком заряда, прошедшего через основание изолятора  $Q/C = \int I(t)dt/C$  (точки 3), если принять  $C = 0.003$  pF и устранить небольшой сдвиг нуля сигнала  $I(t)$ . Ток утечки через изолятор мал даже на фоне небольшого тока смещения, созданного рассеянным электрическим полем. Потеря заряда электродом происходит исключительно путем разряда через воздух. Точки 4 в отличие от точек 1, получены при низкой влажности воздуха (влажность 46%, температура 27°C). Они свидетельствуют об очень медленном экспоненциальном падении заряда.

Результаты этого эксперимента показывают наличие специфического для условий повышенной влажности вида электрического разряда, вызывающего быструю утечку заряда с поверхности в воздух. Особенность этого явления — неэкспоненциальная зависимость заряда от времени,  $Q \sim e^{-\sqrt{t/t_0}}$ .

Первое, что предпринимают при изучении электрического разряда — это смена полярности напряжения.



**Рис. 2.** Потенциал изолированного кварцевого стержня при влажности воздуха 65% ( $T = 30^\circ\text{C}$ ) (точки 1) и 46% (4). Линия 2 — аппроксимация данных функцией  $12.2e^{-(t/59)^{0.47}} + 0.56e^{-(t/4.6)10^4} + 0.178$ . Точки 3 — прошедший через изолятор заряд,  $Q$ , разделенный на  $C = 0.003$  pF, влажность 65%.



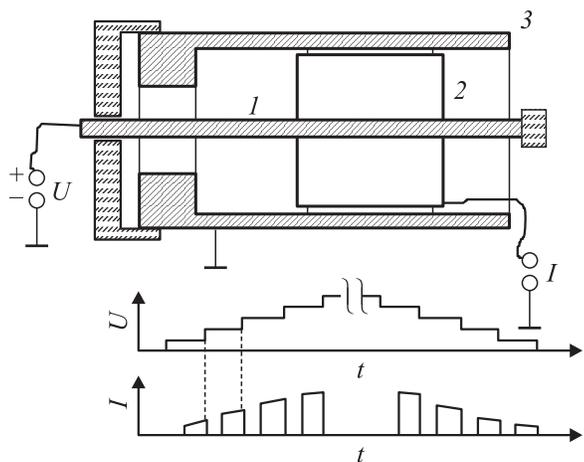
**Рис. 3.** Потенциал изолированного медного стержня после кратковременного прикосновения проводником под потенциалом  $-14$  (точки 1) и  $+14$  kV (2). Линии — аппроксимация.

Большинство опытов проводилось при положительном напряжении электрода. При высокой влажности и отрицательном напряжении на электроде, так же как и при положительном, происходит быстрый разряд, но количественно он не воспроизводится. На рис. 3 показан результат одного из сравнительных экспериментов, когда полярность заряда медного стержня менялась циклически. При отрицательном заряде (рис. 3, точки 1) потенциал на начальном этапе падал экспоненциально, аппроксимация  $U = -7.8e^{-(t/228)} - 4.4e^{-(t/6.1 \cdot 10^4)^{0.4}}$ , а при положительном заряде — по растянутой экспоненте,  $U = 9e^{-\sqrt{t/100}}$ . Низкая воспроизводимость временных параметров разряда отрицательной полярности означает, что он происходит на малочисленных центрах, которые не включаются при положительном напряжении.

При обсуждении физической природы электрического разряда важно знать, какую роль в нем играет поверхность электрода. Некоторое представление об этом дают опыты, в которых медный стержень смачивался этиловым спиртом, высушивался и помещался во влажный воздух. После этого наблюдался электрический разряд, с прежней зависимостью  $U(t) \sim e^{-\sqrt{t/\tau}}$ , но характерным временем  $\tau$ , увеличенным в 20 раз. Аналогичный эффект достигался смачиванием электрода раствором  $\text{CaCl}_2$ .

## Измерения тока разряда

Изменение потенциала является косвенным свидетельством наличия электрического разряда, происходящего в условиях, когда электрическое поле меняется во времени и искажает естественную кинетику процессов разряда. Для подтверждения этого факта необ-



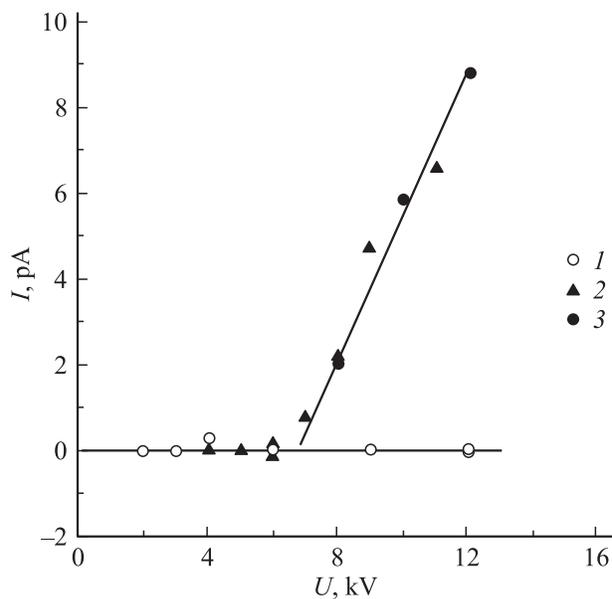
**Рис. 4.** Расположение электродов при измерении тока разряда: 1 — высоковольтный электрод, 2 — коллектор, 3 — заземленный электрод. Также показаны характерные графики напряжения,  $U(t)$ , и токового сигнала на входе усилителя,  $I(t)$ .

ходимы прямые измерения разрядного тока. Это является непростой задачей, поскольку ток смещения при изменении напряжения электрода может многократно превосходить ионный ток. Для наблюдения разрядного тока была собрана установка, изображенная на рис. 4. Высоковольтным электродом служил медный цилиндр 1 диаметром 6 мм, который находился внутри заземленного цилиндра 3 диаметром 60 мм и высотой 200 мм. Ток снимался с коллектора 2, перекрывавшего участок заземленного цилиндра высотой 80 мм. Перед изменением напряжения  $U$  электрода 1 и в течение 60 с после этого вход измерителя тока замыкался, в дальнейшем схема измерения была такой же, как и при измерениях тока утечки.

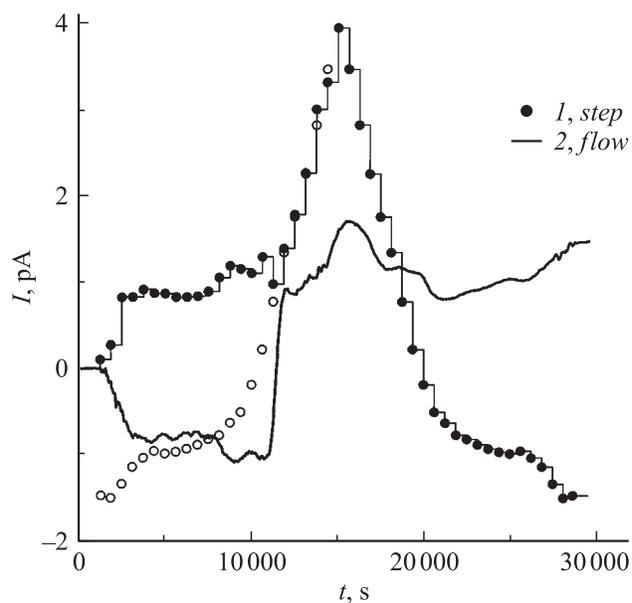
На рис. 5 показаны значения установившегося тока при различных напряжениях  $U$  и разной влажности воздуха. При относительной влажности 50% (точки 1) ток не фиксировался. При влажности 74% (2 и 3) ток линейно рос с напряжением, начиная от порогового напряжения 6.7 кВ. Приведенные результаты показывают наличие слаботочного разряда во влажном воздухе, но линейная зависимость тока от напряжения не согласуется с неэкспоненциальной кривой потенциала изолированного электрода. Это означает, что зависимость потенциала от времени является не результатом специфической нелинейной вольт-амперной характеристики разряда, а проявлением релаксационного процесса. Следует отметить, что помехи, создаваемые высоковольтным источником, не позволяли наблюдать ток, существенно меньший 1 пА, и было возможно моделировать только быструю фазу разряда изолированного электрода.

Для наблюдения релаксационного процесса были проведены опыты, в которых потенциал  $U$  повышался ступенями от 0 до 11 кВ с шагом 0.5 кВ, а затем таким же образом уменьшался (см. рис. 4). Длительность ступени в разных экспериментах варьировалась от 110

до 620 с. Растянутый во времени релаксационный процесс нужно было отделить от мгновенной реакции тока на изменение напряжения. Для этого были определены скачки тока в моменты роста напряжения и построена ступенчатая функция суммы скачком, отображающая то, как менялся бы ток, если бы его реакция на напряжение была чисто статической. На рис. 6 она



**Рис. 5.** Отсутствие тока разряда при влажности воздуха 50% (точки 1) и установившийся ток при влажности 74% в двух сериях измерений (2, 3).



**Рис. 6.** Ток разряда. Напряжение изменялось в пределах 0–11–0 кВ шагами по 0.5 кВ. Показаны ступени тока, возникающие синхронно со ступенями напряжения (точки 1) и остающаяся запаздывающая часть токовой кривой (2);  $\circ$  — зеркальное отражение точек, находящихся справа от максимума.

представлена точками  $I$ . Ступенчатая функция не имеет гистерезиса. В этом можно убедиться, отразив зеркально во времени относительно точки максимума напряжения спадающую ветвь этой зависимости (О). Быстрая реакция тока на изменение напряжения подобна реакции линейного проводника. Отняв от величин измеренного тока значения ступенчатой функции, мы получим запаздывающую часть тока разряда (рис. 6, кривая 2). Эта кривая после достижения порогового напряжения обнаруживает растянутый во времени процесс развития электрического разряда, на который не влияют скачки напряжения. В опытах, подобных отображенному на рис. 6, когда продолжительность ступени напряжения была  $\tau = 620$  s, заметный ток разряда появлялся при напряжении  $U = 8.3$  kV, затем устанавливалась зависимость тока от напряжения  $I \sim U - U_0$  с пороговым напряжением  $U_0 = 6.7$  kV. Если менять напряжение быстро, с  $\tau < 200$  s, гистерезиса не наблюдается, причем ток появляется раньше, чем при медленном его изменении, — начиная с 6.7 kV. При медленном росте напряжения происходит самозапирание разряда, причем процесс этот не сопровождается заметным током в разрядном промежутке.

## Обсуждение результатов

По результатам экспериментов можно было бы сказать, что имеет место коронный разряд [5], однако более внимательное рассмотрение явления обнаруживает его существенные отличия от коронного разряда. Последний характеризуется током порядка  $1 \mu\text{A}$ , ограниченным пространственным зарядом и имеет квадратичную вольт-амперную характеристику. Мы имеем дело с токами  $\approx 1$  pA, когда только макроскопические тела могут создать заметный пространственный заряд и линейную зависимость тока от напряжения. Главной особенностью наблюдаемого нами разряда является его критическая зависимость от влажности воздуха. Обсудим качественно модели данного явления.

Если принимать в расчет только процессы в газовой среде и искать особенную форму коронного разряда, то такой разряд должен создавать фиксированную плотность носителей заряда при разных токах. Механизм такого разряда трудно представить. Гораздо проще искать процесс, лимитирующий ток на поверхности электрода. Линейная зависимость тока от напряжения указывает на наличие проводящей среды с постоянной плотностью носителей заряда. Таковой является тонкая пленка электролита. В нормальном к поверхности электрическом поле  $E$  на поверхности пленки будет накапливаться экранирующий поле заряд. Имеется предел плотности заряда, который может удерживаться поверхностью. За этим пределом заряд начнет эмитироваться в воздушную среду — при этом экранировка внешнего поля нарушится, и в пленке появится ток  $I \sim E - \frac{1}{\epsilon_0} \sigma$ , где  $\sigma$  — поверхностная плотность заряда. У этой фено-

менологической модели есть существенная слабость. Пороговое электрическое поле для развития разряда составляет около  $10$  kV/cm, а величина работы выхода сольватированного заряда с поверхности электролита в воздух  $\approx 7$  eV [6]. Это больше, чем работа выхода электрона из металла. Полевая эмиссия с электролитических электродов должна наблюдаться в том же диапазоне электрического поля  $> 10^6$  V/cm, что и эмиссия из металла. Необходимое для полной эмиссии поле может создаваться только на остриях, а сами острия должны становиться проводящими при высокой влажности воздуха. Разумно предположить, что источником появления острий является диэлектрическая пыль, на которой образуется проводящая пленка электролита. Четко определенный полевой порог эмиссии говорит о том, что эмитирующие острия удалены от поверхности электрода и однородны. Эффект запираания разряда при медленном повышении напряжения можно объяснить тем, что на остриях конденсируется „капля“ жидкости, увеличивающая их радиус кривизны. Кривая заряда изолированного проводника имеет форму растянутой экспоненты. Эта временная зависимость характерна для релаксационных процессов в конденсированных средах [7–9]. Растянутая экспонента не воспроизводится при измерении тока разряда с проводника под фиксированным потенциалом — она является результатом самоорганизующегося во времени процесса.

## Список литературы

- [1] Wang F., Zhang Q., Qiu Y., Kuffel E. // IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation. 2002. P. 426–429.
- [2] Feng W., Yuchang Q., Pfeiffer W., Kuffel E. // IEEE Transact. on Dielectrics and Electrical Insulation. 2004. Vol. 11. N 5. P. 847–854.
- [3] Wintle H.J., Pepin M.P. // J. Electrostat. 2000. Vol. 48. N 2. P. 115–126.
- [4] Feng W., Yuchang Q., Xinran L., Pfeiffer W., Kuffel E. // Plasma Sci. Technol. 2006. Vol. 8. P. 565–568.
- [5] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 533 с.
- [6] Поляков О.В., Бадалян А.М., Бахтурова Л.Ф. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2003. Т. 1. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2007-01-16-001.pdf>.
- [7] Disorder Effects of Relaxation Processes / Ed. by R. Richert, A. Blumen. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1994. 754 p.
- [8] Tolkachev V.A. // Reactivity of solids: Past? Present and Future / A Chemistry for 21th Century monograph / Ed. by Boldyrev. Oxford: Blackwell Science, 1996. P. 185–221.
- [9] Баткин В.И., Савченко О.Я. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 11. С. 45.