

УДК 537.527.9; 537.53  
EDN: EMSDBV

PACS: 52.50.Dg



## Формирование в воздухе низкого давления плазменных диффузных струй большого диаметра

В. Ф. Тарасенко, В. А. Панарин, В. С. Скакун, Н. П. Виноградов

*Изучено формирование плазменных диффузных струй (ПДС) красного цвета, инициируемых ёмкостным разрядом в воздухе при давлениях 0,1–10 Торр. При импульсно-периодическом режиме разряда в трубке диаметром 15 см получены данные о размерах и свойствах ПДС, в том числе, встречных с различной и одинаковой полярностью фронта. Приводятся фотографии свечения разряда в различных режимах. Подтверждено, что при одинаковой полярности импульсов напряжения излучение встречных ПДС подавляется. Показано, что во время столкновения однополярных ПДС, формируемых от двух генераторов, яркость свечения разрядной плазмы между кольцевыми электродами увеличивается.*

*Ключевые слова:* плазменная диффузная струя, воздух низкого давления, столкновение двух струй, ёмкостной разряд.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-2-31-37

### Введение

Три последних десятилетия значительное внимание уделяется изучению импульсных атмосферных разрядов, которые возникают на высотах более 20 км над уровнем моря [1]. Наибольший интерес проявляется к изучению спрайтов, имеющих преимущественно красный цвет и наблюдаемых в диапазоне высот 40–100 км [2–5]. Фотографирование спрайтов и другие измерения осуществ-

ляется в наземных лабораториях [6], а также с самолётов [7], спутников [8] и Международной космической станции [9]. Параллельно проводится изучение аналогов высотных разрядов в лабораторных условиях [10–13]. Для этого используются различные режимы разрядов при низких давлениях воздуха.

В работах [14–17] было показано, что, создавая плазму в трубках, заполненных атмосферным воздухом до давлений доли – единицы Торр, можно формировать плазменные диффузные струи (ПДС) красного цвета. С уменьшением давления длина струй превышает 1 метр и их фронт достигает торцевых фланцев. Инициирование ПДС в работах [14–17] осуществлялось за счёт плазмы импульсно-периодического ёмкостного разряда. Electroды располагались на внешней поверхности кварцевой трубки с внутренним диаметром 5 см и толщиной стенок 2,5 мм, соответственно, плазма ёмкостного разряда не контактировала с металлическими электродами.

Импульсно-периодический режим был выбран для облегчения наблюдения и фотографирования ПДС при их регистрации. Формируемые струи состояли из стримеров, име-

Тарасенко Виктор Федотович, гл.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Панарин Виктор Александрович, н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: panarin@loi.hcei.tsc.ru

Скакун Виктор Семёнович, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: skakun@loi.hcei.tsc.ru

Виноградов Никита Петрович, аспирант.

E-mail: vinikitavin@mail.ru

Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Академический, 2/3.

Статья поступила в редакцию 7.02.2024

Принята к публикации 28.02.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

© Тарасенко В. Ф., Панарин В.А., Скакун В.С.,  
Виноградов Н.П., 2024

ющих красный цвет [17] и по многим параметрам, таким как скорость фронта, спектры излучения, величина приведённого электрического поля и другим, соответствовали свойствам столбчатых спрайтов. Однако малый (5 см) внутренний диаметр кварцевых трубок не позволял формировать ПДС с большим диаметром. Соответственно, интенсивность излучения в отдельном импульсе была мала, и при фотографировании надо было увеличивать экспозиции и частоты следования импульсов. Кроме того, импульсно-периодический режим разряда был нужен для осуществления стабильного предварительного пробоя воздуха в трубке с электродами, расположенными на её внешней поверхности. Известно, см., например, работы [1–5], что размеры столбчатых спрайтов на несколько порядков больше, а их диаметр составляет десятки сотни метров. Поэтому для более точного моделирования их свойств необходимо увеличивать размеры ПДС, в первую очередь диаметр.

Цель данной работы – изучить возможность формирования плазменных диффузных струй с диаметром до  $\approx 15$  см в трубке соответствующего диаметра, используя для их инициирования ёмкостной разряд, в том числе при столкновении двух встречных ПДС, создаваемых импульсами напряжения с одинаковой и разной полярностью.

Отметим, что ранее в работе [18] столкновение волн ионизации исследовалось в неоне и аргоне, используя трубку с диаметром 1,5 см, а изучение взаимодействия ПДС проводилось в работе [19], где применялась трубка диаметром 5,5 см.

### Установка и методики

Для формирования ПДС применялись два одинаковых генератора, которые включались одновременно или по одному, и различные конструкции электродов. Упрощённая схема установки, показывающая расположение электродов, приведена на рис. 1а.

Внутренний диаметр прозрачной в видимой области спектра трубки 1 в данных экспериментах был увеличен до 14,2 см. Её длина равнялась 147 см. В экспериментах применялись по одной паре электродов (2–3 или 6–8), а также одновременно две пары кольцевых электродов (2–3 и 4–5), на которые подавались импульсы напряжения различной полярности. Электроды 2, 3, 4, 5 и 8 были выполнены из металлических полосок шириной 1 см, которые устанавливались на внешней поверхности трубок 1 и 7. Расстояние между электродами 2–3, 4–5 и 6–8 составляло 6 см.

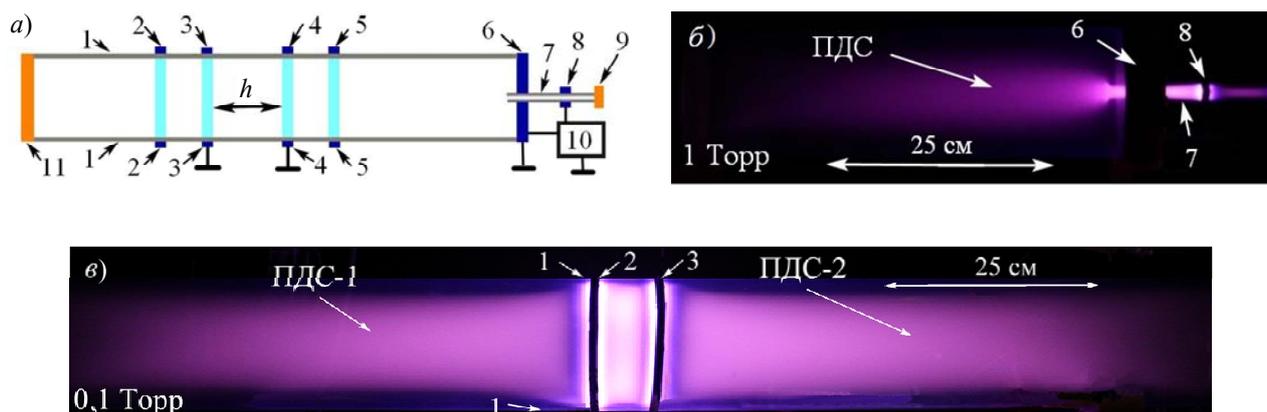


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и фотографии свечения разряда при подаче импульсов напряжения положительной полярности на электроды 6–8 от импульсного генератора 10, и экспозиции 0,25 с (б), а также при подаче от генератора, аналогичного генератору 10, на электроды 2–3, и экспозиции 1 с (в). 1 – трубка из поликарбоната ESALUX TX с внешним диаметром 15 см и толщиной стенки 4 мм; 2, 5 и 8 – высоковольтные электроды; 3, 4 и 6 – заземлённые электроды; 7 – кварцевая трубка с внешним диаметром 21 мм и толщиной стенки 1,5 мм; 9 и 11 – фланцы из капрлона; 10 – импульсный генератор, подключённый к электродам 6 и 8, с амплитудой импульса напряжения  $U = 7$  кВ и частотой  $f = 21$  кГц. Относительная влажность в лабораторном помещении 12 %, а температура 23 °С

Электрод 6 имел форму диска с отверстием в центре, через которое проходила кварцевая трубка 7 с внешним диаметром 21 мм и толщиной стенок 1,5 мм. Эта трубка выступала над поверхностью диска внутрь основной трубки 1 на 4 см. При фотографировании ПДС с электродами 6–8, электроды 2–3 и 4–5 убирались. Для инициирования разряда и формирования диффузных струй использовались один генератор 10, или два генератора, которые на рис. 1а не показаны. Генераторы формировали импульсы напряжения с амплитудой  $\approx 7$  кВ и длительностью на полувывоте  $\approx 1,3$  мкс. Фронт и спад импульсов напряжения имели длительность около 0,4 мкс. Полярность генераторов могла быть как положительной, так и отрицательной. Частота следования импульсов, как и в работах [14–17, 19], обычно составляла 21 кГц.

Электроды 3 и 4, вместе с электродами 2 и 5, устанавливались в центральной части трубки 1 на расстояниях друг от друга  $h$  равных 6, или 12, или 18 см. Импульсы напряжения от двух генераторов с одинаковыми или разными полярностями подавались на две пары кольцевых электродов (2–3 и 4–5). От одного генератора импульсы напряжения подавались только на одну из этих пар электродов. Второй генератор оставался подсоединённым ко второй паре электродов, но напряжение на него не подавалось. Также проводились опыты, в которых электроды 4–5 и генератор, подсоединённый к ним, убирались.

Форма импульсов напряжения измерялась с помощью делителей АКТАКОМ АСА-6039. Сопротивления делителя были 900 кОм (низковольтное плечо) и 900 МОм (высоковольтное). Ток разряда определялся шунтами с сопротивлением 3 Ом, которые включались последовательно с заземлёнными электродами и генераторами. Сигналы с делителей и шунтов подавались на осциллограф RIGOL DS2302A (300 МГц, частота дискретизации 2 выборки/нс). Оптическое излучение плазмы разряда в трубке регистрировалось цифровым фотоаппаратом Canon 2000D и спектрометром HR2000+ES (диапазон 200–1150 нм; оптическое разрешение  $\approx 0,9$  нм) с известной спектральной чувствительностью. Фотографирование разряда и измерение спектров излучения проводились в отсутствие постороннего освещения за тысячи импульсов.

## Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1б при давлении атмосферного воздуха 1 Торр приведена фотография свечения плазмы в условиях подачи импульсов напряжения на электроды 6 и 8. Электроды 2–3 и 4–5 убирались. Ток разряда был ограничен одним диэлектрическим барьером, стенкой кварцевой трубки 7. Плазма предварительного разряда с левой стороны относительно читателя огибала торец трубки 7 и замыкалась на левую плоскость дискового электрода 6, изготовленного из дюралюминия. Эта плазма из области у левого торца трубки 7 инициировала формирование плазменных диффузных струй, направленных внутрь трубки 1, число которых равнялось числу поданных импульсов напряжения. Цвет ПДС имел красный оттенок и его интенсивность уменьшалась при удалении от торца трубки 7. Диаметр струи и её длина, как и в трубке с внутренним диаметром 5 см, см. публикации [14–17], зависели от давления воздуха и уменьшались с увеличением давления. Диаметр ПДС с удалением от торца трубки 7 при давлении воздуха 1 Торр увеличивался от 1,8 до 6 см, а затем существенно не изменялся.

На рис. 1в показана фотография свечения плазмы при использовании одной пары кольцевых электродов, которые располагались в центре трубки 1 и подключались к генератору при различных полярностях импульса напряжения. Разряд, инициирующий плазменные струи, вначале возникал в области между электродами 2–3 внутри трубки 1. ПДС генерировались в обе стороны от инициирующего разряда. Они распространяются к торцам трубки и хорошо видны с обеих сторон от электродов 2 и 3. Диаметр ПДС, а также интенсивность их излучения, уменьшалась при удалении от кольцевых электродов. Причём, с увеличением давления фронт ПДС принимал форму конуса. Между ПДС и областями в виде узких полос яркого свечения у электродов 2 и 3 регистрировались тёмные области шириной около 1 см. С увеличением давления до нескольких Торр ПДС переставали формироваться, хотя пробой воздуха в области трубки 1 между электродами 2–3 имел место.

При прочих равных условиях, длина ПДС в трубке с внутренним диаметром 14,2 см уменьшилась по сравнению с длиной ПДС в трубке с диаметром 5 см. Это может

объяснить уменьшением удельного энергозатрата в газ. Поэтому на рис. 1в фотография приведена для давления 0,1 Торр. Это давление соответствует высоте над уровнем моря  $\approx 65$  км, при которой наблюдаются столбчатые спайты красного цвета, см., например, [1, 2]. Также было установлено, что при увеличении диаметра трубки и установке одной пары электродов (2–3 или 4–5) для зажигания разряда и инициирования ПДС нужно уменьшать давление воздуха и(или) увеличивать длину соединительного проводника между электродом 2 и местом контакта с заземленным на экспериментальном стенде.

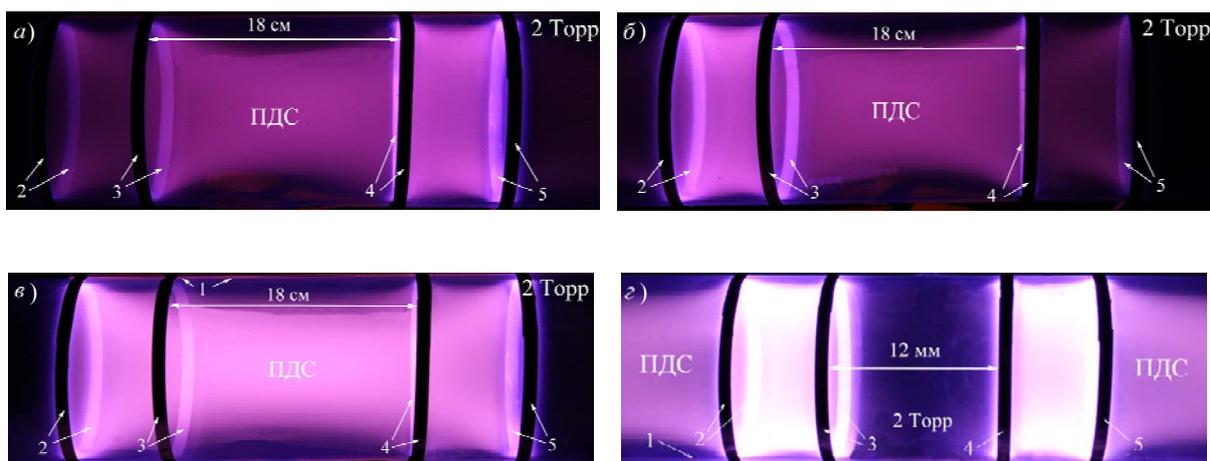
Влияние на форму ПДС при давлении воздуха 2 Торр зазора между электродами 3 и 4, а также полярности импульсов напряжения двух генераторов показано на рис. 2.

Давление воздуха в этих экспериментах было увеличено для сокращения длины ПДС. При увеличении давления, применении двух пар кольцевых электродов и расстоянии между электродами 3–4 равном 18 см ПДС имеют существенно большую яркость при распространении в сторону, расположения второй пары электродов, чем к торцу трубки. В этих опытах импульсы напряжения подавались только на одну пару электродов.

На рис. 2а, при подаче импульса напряжения на электроды 4–5, ПДС хорошо видна

только слева от электрода 4. Её свечение усиливает наличие заземленного электрода 3 и электрода 2, соединенных с обмоткой высоковольтного трансформатора, установленного в генераторе, который подключался к электродам 2–3. Напряжение питания при этом на генератор не подавалось, а оба электрода (2 и 3) оказывались заземленными. Основное уменьшение интенсивности излучения ПДС наблюдалось у электрода 3, который заземлялся коротким проводником и располагался первым на её пути.

Если напряжение от генератора подавалось на электроды 2–3, а второй генератор был подсоединён к электродам 4–5, но также без его включения, регистрировалась подобная форма разряда, рис. 2б. ПДС хорошо видна только справа от электрода 3. Её свечение усиливает наличие заземленного электрода 4 и электрода 5, соединенных с обмоткой высоковольтного трансформатора второго генератора. ПДС, которая распространяется влево от электрода 2 при экспозиции 1 с не заметна. Таким образом, дополнительные заземленные электроды с одной стороны от места инициирования стимулируют распространение ПДС в их направлении, но с другой стороны ограничивают её распространение или существенно уменьшают интенсивность свечения ПДС после прохождения заземленного электрода.



**Рис. 2.** Фотографии свечения разряда от одного генератора при экспозиции 1 с и подаче импульсов напряжения положительной полярности на электроды 4–5 (а) или электроды 2–3 (б), а также при экспозиции 1 с и одновременной подаче импульсов напряжения отрицательной полярности на электрод 2 и положительной полярности на электрод 5 от двух генераторов, аналогичных генератору 10, (в), или импульсов напряжения положительной полярности на электроды 2 и 5 (г). 1 – трубка из поликарбоната ESALUX TX с внешним диаметром 15 см и толщиной стенки 4 мм; 2 и 5 – высоковольтные электроды; 3 и 4 – заземленные электроды.  $|U| = 7$  кВ,  $f = 21$  кГц

Включение одновременно двух генераторов с различной, рис. 2в, и одинаковой, рис. 2г, полярностью подтвердило результаты, полученные ранее на трубке с внутренним диаметром 5 см [19], а также соответствуют результатам, полученным в данной работе при внутреннем диаметре трубки 14,4 см и  $h$  равном 6 и 12 см. С разнополярными генераторами интенсивность излучения в области столкновения двух ПДС увеличивалась и превышала интенсивность излучения между электродами 2–3 и 4–5.

При одновременном включении однополярных генераторов, встречные ПДС подавили друг друга и между электродами 3–4 интенсивность свечения существенно уменьшилась, рис. 2г. Подобная картина наблюдалась и при  $h$  равном 6 и 18 см. Как мы уже отмечали, подавление интенсивности излучения однополярных волн ионизации, инициируемых с металлических электродов в неоне и аргоне при давлении единицы Торр, ранее наблюдалось в трубке диаметром 1,5 см [18].

В данных экспериментах контакта разрядной плазмы с металлическими электродами не было и диаметр ПДС в воздухе достигал 14 см. Также следует отметить, что интенсивность излучения при столкновении встречных ПДС, регистрируемая в областях между электродами 2–3 и 4–5 превышала интенсивность излучения в этих областях при подаче импульсов напряжения от разнополярных генераторов и неизменных остальных условиях.

Осциллограммы импульсов напряжения и тока при увеличении диаметра трубки существенно не изменились по форме, если сравнивать с полученными в работах [14–17, 19] в которых изучались свойства ПДС. Иницирующий пробой происходил на фронте импульса напряжения. Осциллограммы тока, при включении одного генератора на одну пару электродов, имели два основных пика на фронте и спаде импульса напряжения.

В спектры излучения ПДС основной вклад давали полосы второй ( $2+$ ) и первой положительной ( $1+$ ) систем молекулярного азота. При этом спектральная плотность энергии излучения основных полос  $2+$  системы азота была на порядок больше, чем у полос  $1+$  системы, которая определяла красный цвет ПДС. В области высокого электрического по-

ля у кромок кольцевых электродов начинало доминировать излучение полос первой отрицательной ( $1-$ ) системы азота.

## Заключение

В данной работе сформированы плазменные диффузные струи, инициируемые в воздухе низкого давления высокочастотным ёмкостным разрядом, поперечное сечение которых было увеличено на порядок по сравнению с полученными в работах [14–17, 19]. ПДС большого диаметра (до 14 см) распространялись в обе стороны от плазмы, формируемой кольцевыми электродами, расположенными на внешней поверхности трубки и имели красный цвет. Установлено, что, при увеличении диаметра диэлектрической трубки, их свойства подобны свойствам ПДС, полученным в кварцевой трубке с внутренним диаметром 5 см. Спектры излучения ПДС состоят в основном из полос первой и второй положительных систем азота. В области у электродов и между электродами заметный вклад начинает давать первая отрицательная система азота. Подтверждено, что при столкновении двух ПДС, сформированных микросекундными импульсами одной полярности, подаваемыми на две пары кольцевых электродов, наблюдается резкое уменьшение интенсивности излучения в области их взаимодействия. Установлено, что в этих условиях интенсивность излучения между каждой парой электродов, соединённых с различными генераторами существенно возрастает. Показано, что при формировании ПДС импульсами напряжения различной полярности, интенсивность излучения в центральной части трубки между заземлёнными электродами повышается и превышает интенсивность излучения между каждой парой электродов, подключённой к генераторам.

*Авторы благодарят Д. С. Печеницину за создание импульсных генераторов.*

---

*Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 24-29-00166.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Williams E., Valente M., Gerken E., Golka R. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges. – Dordrecht: Springer, 2006.
2. Luque A., Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Haaland R. K. / J. of Geophys. Res.: Space Physics. 2016. Vol. 121. P. 2431–2449.
3. Köhn C., Chanrion O., Neubert T. / J. of Geophys. Res.: Space Physics. 2019. Vol. 124. Art. № 3083.
4. Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Haaland R., Luque A. / J. of Geophys. Res.: Atmospheres. 2020. Vol. 125. Art. № e2020JD033170.
5. Garnung M. B., Celestin S., Farges T. / J. of Geophys. Res.: Space Physics. 2021. Vol. 126. Art. № e2020JA028824.
6. Franz R. C., Nemzek R. J., Winckler J. R. / Science. 1990. Vol. 249. P. 48–51.
7. Sentman D. D., Wescott E. M., Osborne D. L., Hampton D. L., Heavner M. J. / Geophys. Res. Letters. 1995. Vol. 22. P. 1205–1208.
8. Garipov G. K., Khrenov B. A., Klimov P. A., Klimenko V. V., Mareev E. A., Martines O., Mendoza E., Morozenko V. S. et al. / J. of Geophys. Res.: Atmospheres. 2013. Vol. 118. P. 370–379.
9. Jehl A., Farges T., Blanc E. / J. of Geophys. Res.: Space Physics. 2013. Vol. 118. 454–461.
10. Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A., Sobral H. / J. Geophys. Res.: Space Physics. 2017. Vol. 122. P. 948–962.
11. Goto Y., Ohba Y., Narita K. / J. of Atmospheric Electricity. 2007. Vol. 27. № 2. P. 105–112.
12. Соснин Э. А., Бабаева Н. Ю., Кожевников В. Ю., Козырев А. В., Найдис Г. В., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф. / УФН. 2021. Т. 191. № 2. С. 199–219.
13. Evtushenko A., Kuterin F., Svechnikova E. / J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2021. Vol. 221. Art. № 105670.
14. Тарасенко В. Ф., Бакуит Е. Х., Виноградов Н. П. / Прикладная физика. 2022. № 4. С. 11–17.
15. Tarasenko V., Vinogradov N., Baksh E., Sorokin D. / J. of Atmospheric Science Res. 2022. Vol. 05. № 04. P. 26–36.
16. Sorokin D. A., Tarasenko V. F., Baksh E. K., Vinogradov N. P. / Physics of Plasmas. 2023. Vol. 30. Art. № 083515.
17. Тарасенко В. Ф., Бакуит Е. Х., Панарин В. А., Виноградов Н. П. / Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 6. С. 590–599.
18. Shishpanov A. I., Ivanov D. O., Kalinin S. A. / Plasma Research Express. 2019. Vol. 1. № 2. Art. № 025004.
19. Tarasenko V. F., Vinogradov N. P., Baksh E. Kh., Pechenitsyn D. S. / Plasma Physics Reports. 2024. Vol. 50. № 1. P. 153–162.

PACS: 52.80.Hc

## Formation of plasma diffuse jets of large diameter in low-pressure air

V. F. Tarasenko, V. A. Panarin, V. S. Skakun and N. P. Vinogradov

Institute of High Current Electronics, SB RAS  
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia  
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Received 7.02.2024; accepted 28.02.2024

*In air at pressures of a units and fraction-units of a Torr, the formation of red plasma diffuse jets (PDJs) initiated by a capacitive discharge has been studied. In a pulse-periodic discharge mode in a large-diameter tube (15 cm), data were obtained on the dimensions and properties of PDS, including the collision PDJs with different and identical front polarities. Photographs of the discharge glow in various modes are presented. It has been confirmed that with the same polarity of voltage pulses, the emission of counter-propagating PDJs is suppressed. It is shown that during a collision of unipolar PDGs the brightness of the discharge plasma between the ring electrodes connected with two generators increases.*

*Keywords:* plasma diffuse jet, low pressure air, collision of two jets, capacitive discharge.

## REFERENCES

1. Williams E., Valente M., Gerken E. and Golka R., *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*, Dordrecht, Springer, 2006.
2. Luque A., Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G. and Haaland R. K., *J. of Geophys. Res.: Space Physics* **121**, 2431–2449 (2016).
3. Köhn C., Chanrion O. and Neubert T., *J. of Geophys. Res.: Space Physics* **124**, 3083 (2019).
4. Stenbaek-Nielsen H. C., McHarg M. G., Haaland R. and Luque A., *J. of Geophys. Res.: Atmospheres* **125**, e2020JD033170 (2020).
5. Garnung M. B., Celestin S. and Farges T., *J. of Geophys. Res.: Space Physics* **126**, e2020JA028824 (2021).
6. Franz R. C., Nemzek R. J. and Winckler J. R., *Science* **249**, 48–51 (1990).
7. Sentman D. D., Wescott E. M., Osborne D. L., Hampton D. L. and Heavner M. J., *Geophys. Res. Letters* **22**, 1205–1208 (1995).
8. Garipov G. K., Khrenov B. A., Klimov P. A., Klimenko V. V., Mareev E. A., Martines O., Mendoza E., Morozenko V. S. et al., *J. of Geophys. Res.: Atmospheres* **118**, 370–379 (2013).
9. Jehl A., Farges T. and Blanc E., *J. of Geophys. Res.: Space Physics* **118**, 454–461 (2013).
10. Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A. and Sobral H., *J. Geophys. Res.: Space Physics* **122**, 948–962 (2017).
11. Goto Y., Ohba Y. and Narita K., *J. of Atmospheric Electricity* **27** (2), 105–112 (2007).
12. Sosnin E. A., Babaeva N. Y., Kozhevnikov V. Y., Kozyrev A. V., Naidis G. V., Panarin V. A., Skakun V. S. and Tarasenko V. F., *Physics-Uspekhi* **64** (2), 191–209 (2021).
13. Evtushenko A., Kuterin F. and Svechnikova E., *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **221**, 105670 (2021).
14. Tarasenko V. F., Vinogradov N. P. and Baksht E. Kh., *Applied Physics*, № 4, 11–17 (2022) [in Russian].
15. Tarasenko V., Vinogradov N., Baksht E. and Sorokin D. J., *of Atmospheric Science Res.* **05**, (04), 26–36 (2022).
16. Sorokin D. A., Tarasenko V. F., Baksht E. K. and Vinogradov N. P., *Physics of Plasmas* **30**, 083515 (2023).
17. Tarasenko V. F., Baksht E. K., Panarin V. A. and Vinogradov N. P., *Plasma Physics Reports* **49** (6), 786–794 (2023).
18. Shishpanov A. I., Ivanov D. O. and Kalinin S. A., *Plasma Research Express* **1** (2), 025004 (2019).
19. Tarasenko V. F., Vinogradov N. P., Baksht E. Kh. and Pechenitsyn D. S., *Plasma Physics Reports* **50** (1), 153–162 (2024).