

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ПОТОКЕ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ**

**И.Г. Даутов** канд. физ.-мат. наук, **Р.М. Марданшин** канд. техн. наук,

**И.И. Файрушин** аспирант, **Т.Ф. Ашрапов** студент

*КГТУ им. А. Н. Туполева, Казань*

Пылевая плазма представляет собой ионизованный газ, содержащий частицы конденсированного вещества. Пыль и пылевая плазма широко распространены в космосе. Они присутствуют в планетных кольцах, хвостах комет, в межпланетных и межзвездных облаках [1-4]. Пылевая плазма обнаружена вблизи искусственных спутников Земли и космических аппаратов. В технологических процессах нанесения плёнок на поверхности деталей в поток нагретого газа специально вводятся порошки различных материалов и в результате возникает пылевая плазма. Такая плазма возникает и в двигателях летательных аппаратов, генераторах дуговой плазмы и тлеющем разряде [5-9].

В зависимости от условий заряд частицы конденсированного вещества может быть как отрицательным, так и положительным. Первый случай реализуется в сильно неравновесной плазме газовых разрядов низкого давления. Несмотря на высокую энергию электронов, ионы, атомы и макроскопические частицы остаются холодными. В отсутствие эмиссионных процессов заряд пылевой частицы отрицателен. Это связано с тем, что на незаряженную пылевую частицу направлены потоки электронов и ионов из плазмы. Вследствие более высокой подвижности электронов их поток значительно превышает поток ионов и частица начинает заряжаться отрицательно. Появляющийся у частицы отрицательный заряд приводит к отталкиванию электронов и притяжению ионов. Заряд частицы растёт (по абсолютной величине) до тех пор, пока не сравняются потоки электронов и ионов на ее поверхность. Затем он практически остается постоянным во времени и испытывает лишь малые флуктуации около равновесного

значения. Второй случай возникает тогда, когда существенную роль играют процессы электронной эмиссии из пылевых частиц такие как термо-, фото-, экзо-, авто- и вторичная электронные эмиссии. Эмиссия электронов изменяет заряд частицы и при определенных условиях он может оказаться положительным. Особенно важны эти процессы в случаях зарядки частиц конденсированной дисперсной фазы в рабочих средах МГД-генераторов и ракетных двигателей, в верхних слоях атмосферы и в космосе. Однако, взаимодействие такой плазмы с электрическим полем и возникновение в ней электрического разряда практически не исследованы.

В данной работе исследуется электрический разряд в пылевой плазме, состоящей из продуктов сгорания пропана в кислороде и частиц порошка КСl. Для генерации пылевой плазмы и ее исследования разработана экспериментальная установка, показанная на рис.1. Установка состоит из следующих основных частей: вольфрамовые электроды (анод 1 и катод 2) в виде стержня длиной 13 см и диаметром 10 мм установленные на керамических изоляторах 5; дозатор 3, вибратор 8; платинородиевая термопара 4; горелка 6; милливольтметр 7; микроамперметр 9; вольтметры 10 и 11; источник питания 12; ротаметр 13; пропановый редуктор с манометром 14; газовый баллон 15; кислородный редуктор 16; кислородный баллон 17; зонд 19 и координатник 20 для перемещения зонда вдоль разрядного промежутка. Напряжение на электроды подается от стабилизированного источника питания, который выполнен конструктивно в виде отдельного блока. Для контроля значения напряжения использовался вольтметр типа С-53 (класс точности 0,5; цена одного деления 10 В), который входит в блок источника. При этом точность измерения составляла  $\pm 5$  В в абсолютных единицах. Сила тока разряда измерялась с помощью микроамперметра типа М-2000 (класс точности 0,5; цена одного деления 1 мкА). При этом точность измерения составляла  $\pm 0,5$  мкА в абсолютных единицах. Температура измерялась с помощью термопары ТПР-30/6 и

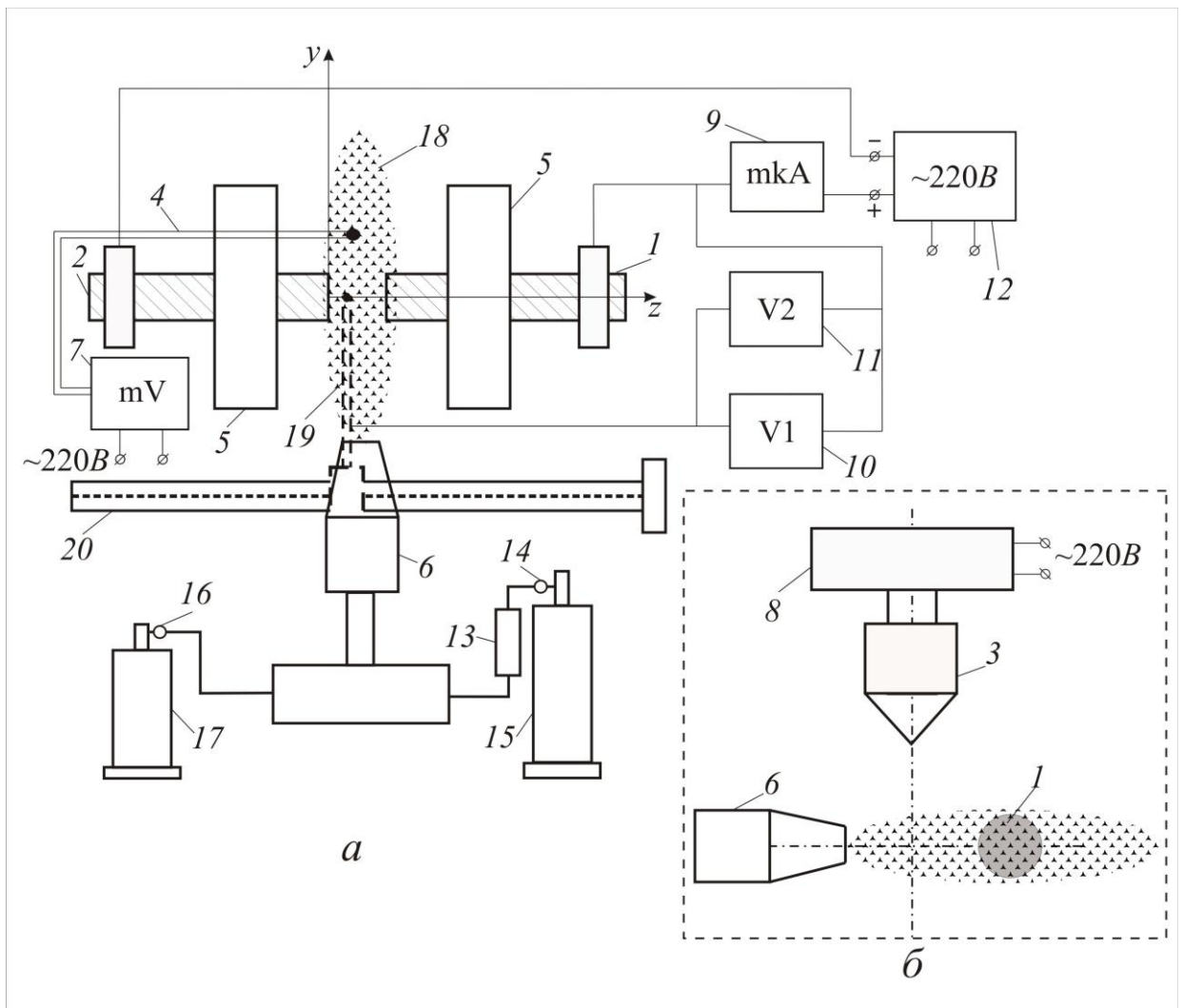


Рис.1.

милливольтметра типа М-136 (класс точности 1,0) с ценой деления 0,2 мВ. При этом погрешность измерения прибором М-136 составляла  $\Delta\varepsilon = \pm 0,1$  мВ или  $\Delta t = \pm 10^0$  С. Расход пропана измеряли с помощью ротаметра типа РМ-А-0,25 ГУЗ (класс точности 4,0), который дает погрешность  $\pm 4\%$  в относительных единицах. Для подачи порошка в разрядный промежуток применялся дозатор вибрационного типа. Массовый расход порошка регулировался изменением напряжения, подаваемого на вибратор. В экспериментах для порошков разной степени дисперсности расход поддерживался одним и тем же и составлял  $G_n = 0.015$  г/с. Благодаря этому удалось изучить влияние размера частиц на эмиссию электронов.

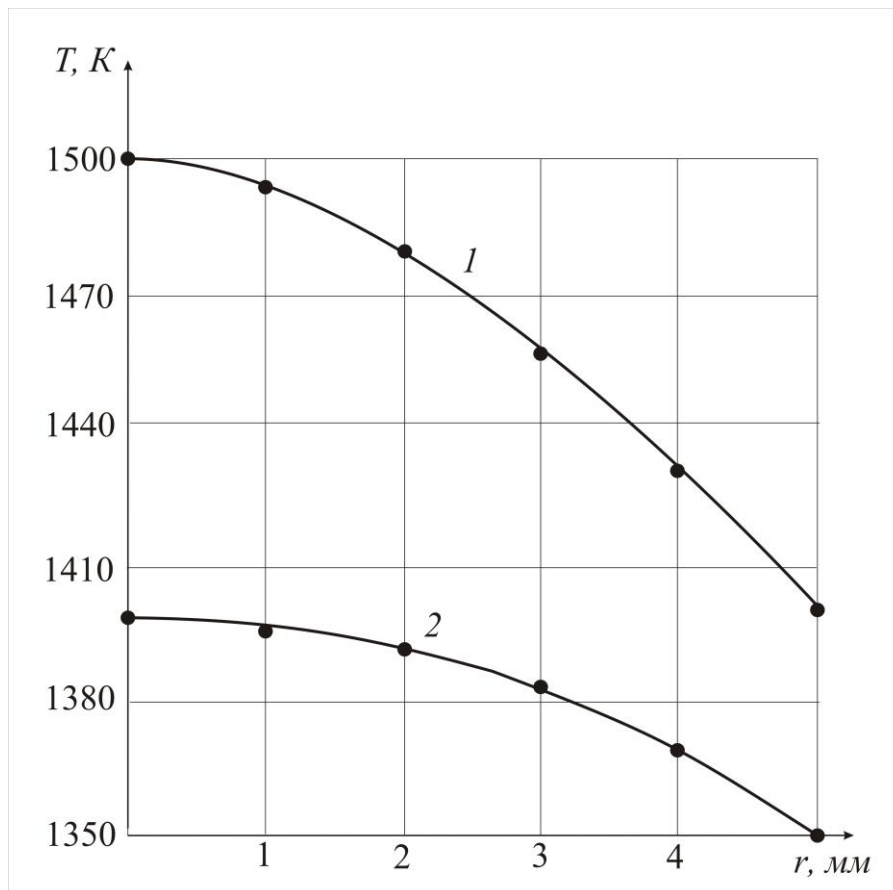


Рис.2. Распределение температуры по радиусу потока ( 1 при  $T_0=1500K$ , 2 при  $T_0=1400K$ ).

На рис.2. показано распределение температуры по радиусу потока в сечении  $y=0$ , где  $T_0$  – температура на оси потока, значение которой регулируется величиной расхода кислорода, подаваемого в разрядный промежуток. Как видно, изменение температуры в диапазоне  $0 \leq r \leq 5$  мм не превышает 7% величины  $T_0$ . Поэтому в первом приближении можно было пренебречь влиянием радиального изменения температуры на характеристики разряда. В экспериментах температура на оси потока не превышала 1500К. При таких низких температурах термической ионизацией можно было пренебрегать [10-11]. Таким образом, в условиях проводимых экспериментов заряженные частицы возникали за счет эмиссии электронов пылевыми частицами. Исследуемый разряд поддерживался заряженными частицами, поступающими в межэлектродную область вместе с потоком газа. Следовательно, этот разряд является несамостоятельным [12,13]. Однако в отличие от ранее исследованных несамостоятельных разрядов часть заряженных частиц выносятся этим же потоком из межэлектродной области.

Из рис. 3-5 видно, что начальные участки вольт – амперных характеристик являются линейными, что является одним из главных признаков самостоятельного разряда [12,13]. Сравнение графиков этих рисунков показывает существенное увеличение силы тока при подаче порошка. Кроме того сила тока зависит от размеров частиц порошка. При подаче более мелкого порошка (диаметр частиц  $d=0.15-0.3$ ) сила тока в 5 раз больше, чем при подаче более крупного порошка (рис.4). Это говорит о возрастании эмиссии электронов при делении твердой частицы на более мелкие, что согласуется с результатами теоретических расчетов работы [14]. При больших напряжениях и высоких температурах появляется отклонение характеристик от линейной зависимости, что свидетельствует о начале ионизационного усиления тока. Описанные в [12,13] разряды при дальнейшем увеличении силы тока последовательно переходят в тихий самостоятельный разряд, нормальный тлеющий разряд, аномальный тлеющий разряд и дуговой разряд. Кривая 1 рис. 3 показывает, что данный разряд после участка ионизационного усиления переходит в дугу, минуя вышеперечисленные стадии. Таким образом, разряд в пылевой плазме существенно отличается от ранее исследованных электрических разрядов.

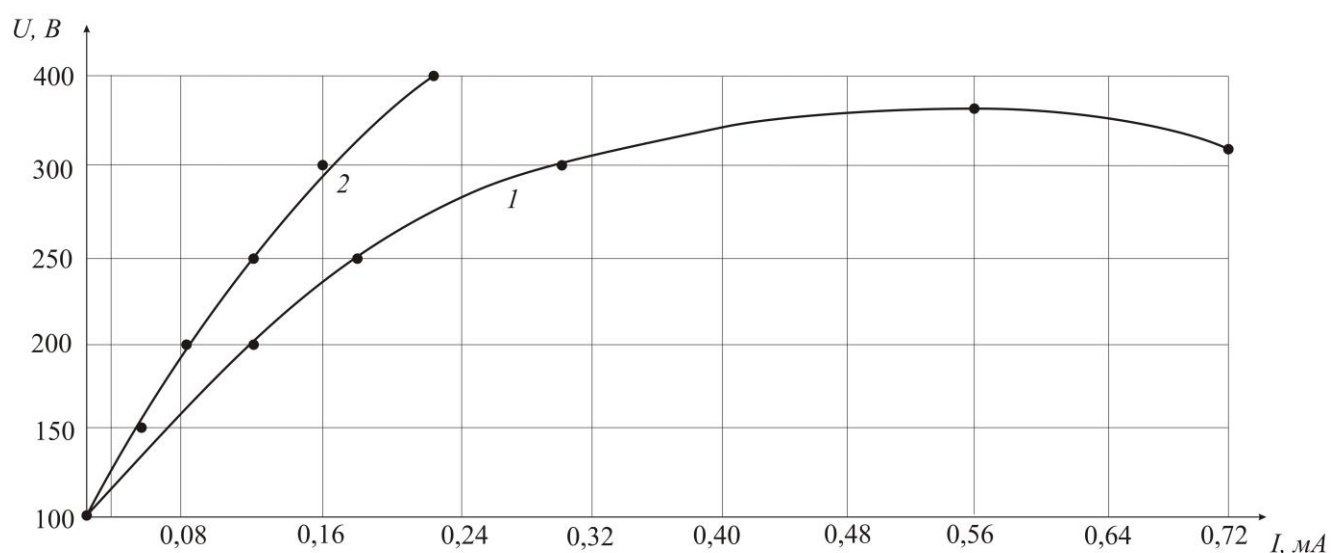


Рис. 3. ВАХ разряда в потоке смеси продуктов сгорания

и порошка KCl при  $T_0=1500 K$

(кривая 1 при  $d=0.15-0.3$  мм, кривая 2 при  $d=0.3-0.5$  мм)

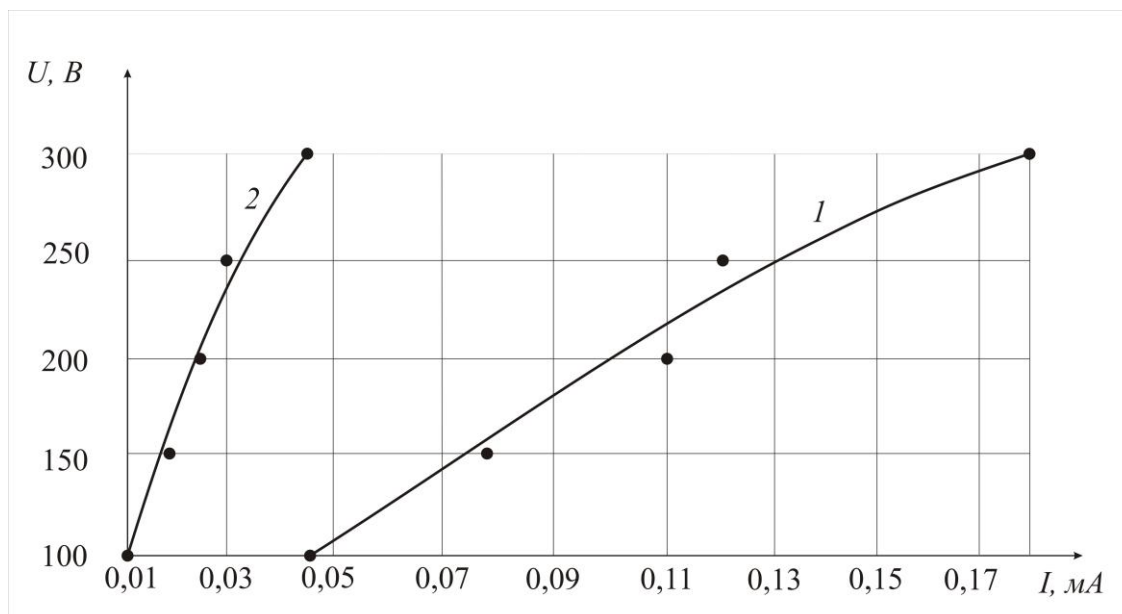


Рис. 4. ВАХ разряда в потоке смеси продуктов сгорания и порошка КСl при  $T_0=1400$  K (кривая 1 при  $d=0.15-0.3$  мм, кривая 2 при  $d=0.3-0.5$  мм)

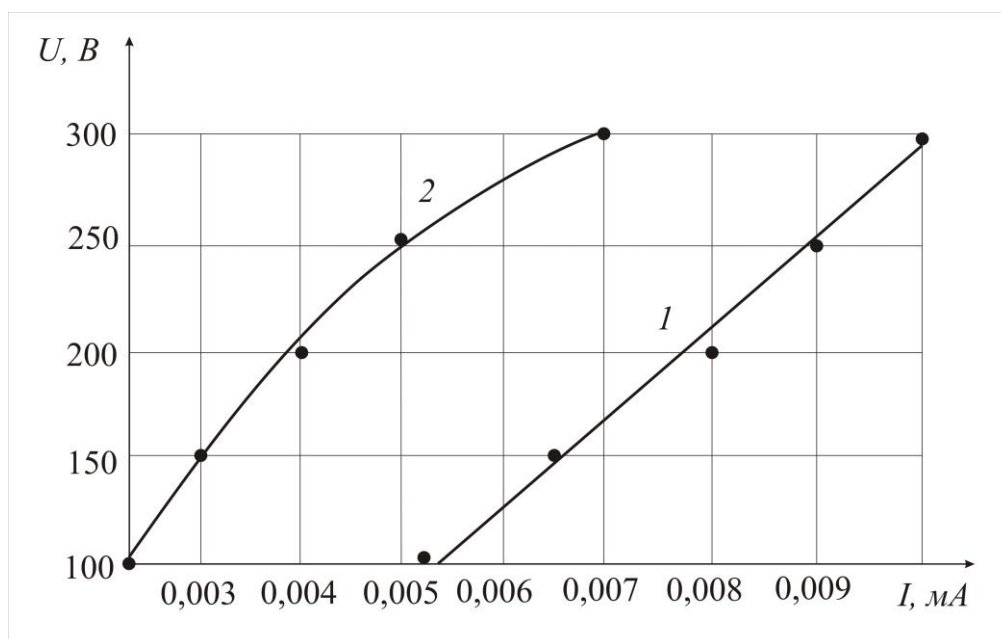


Рис. 5. ВАХ разряда в потоке продуктов сгорания (кривая 1 при  $T_0=1500$  K, кривая 2 при  $T_0=1400$  K)

Кроме того следует отметить, что при проведении экспериментов как с порошком КСl, так и без него, на катоде наблюдалось образование нитевидных скоплений сажи. Исследования, проведенные с помощью

просвечивающего электронного микроскопа, показали наличие сферических сажевых частиц размерами от 50 до 200 нм. Отсюда можно сделать вывод, что продукты сгорания пропана в кислороде также представляют собой пылевую плазму. По-видимому, этим можно объяснить воздействие электрического поля на пламя в ракетных двигателях, описанное в работе [9]. Вольт-амперная характеристика разряда в такой плазме показана на рис.5.

На рис. 6а и 7а представлены распределения потенциала вдоль разрядного промежутка. Поверхность катода располагается в сечении  $z=0$ , а поверхность анода в сечении  $z=l$  (рис.8). За начало отчета потенциала принят потенциал катода. Из этих рисунков видно, что в прикатодной области I с ростом  $z$  потенциал резко возрастает, в области II с ростом  $z$  потенциал растет медленно, практически по линейному закону. В прианодной области III снова начинается заметный рост потенциала. Сравнение графиков рис. 7а показывает, что при заданном напряжении разряда распределение потенциала зависит от подачи порошка и размеров пылевых частиц.

Распределение напряженности электрического поля вдоль разрядного промежутка  $E_z$  определено экспериментально с учетом соотношения

$$E_z = -\frac{d\varphi}{dz} \approx -\frac{\Delta\varphi}{\Delta z}, \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi$  разность потенциалов между двумя соседними точками, а  $\Delta z$  - расстояние между этими точками.

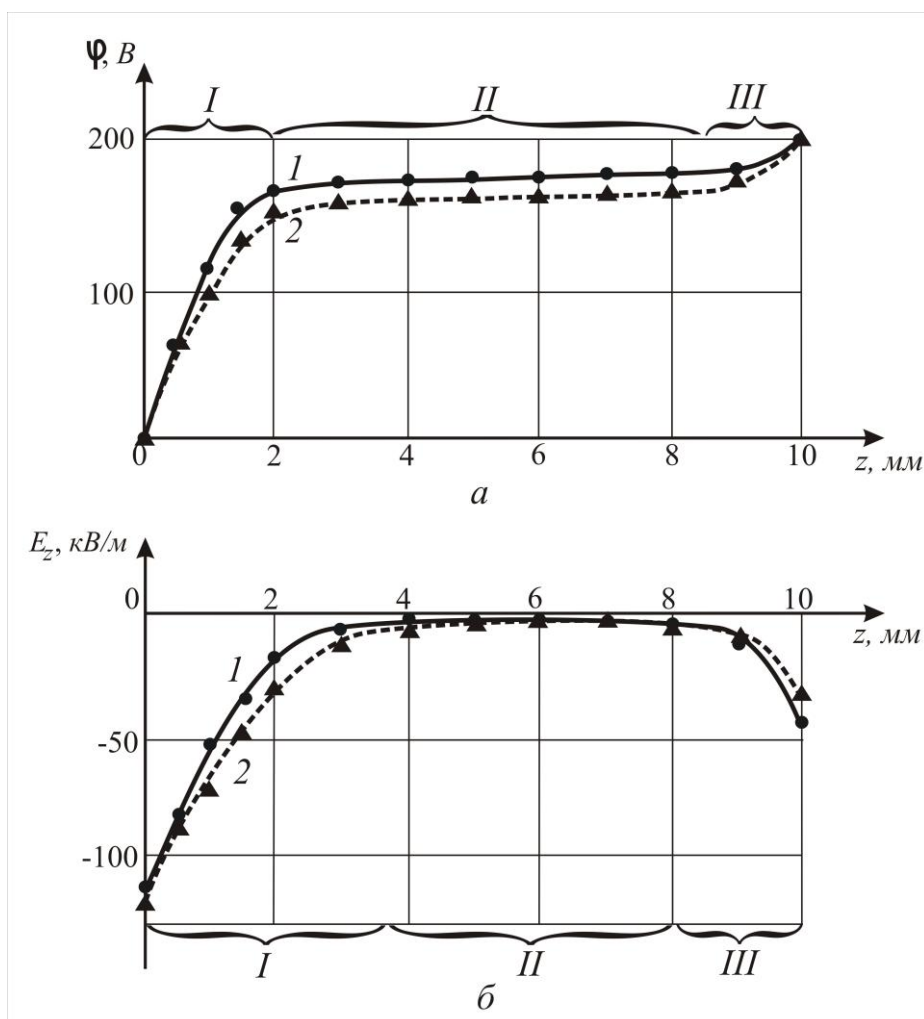


Рис. 6. Распределения потенциала (а) и напряженности электрического поля (б) при  $U=200$  В,  $d=0,3-0,5$  мм (1 при  $T_0=1400$ К,  $I= I=0.024$  мА; 2 при  $T=1500$ К,  $I=0.09$  мА)



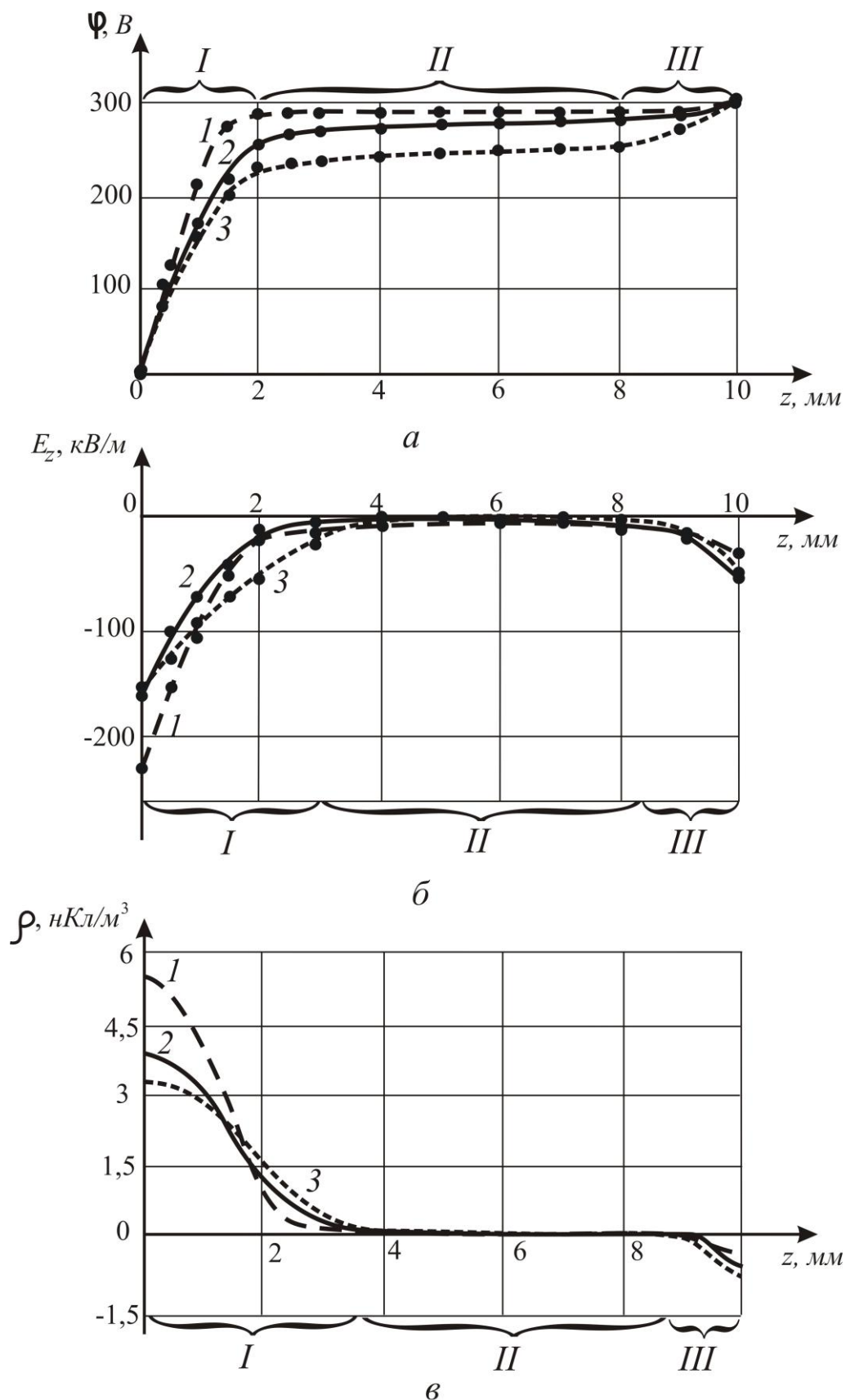


Рис.7. Распределения потенциала (а), напряженности электрического поля (б) и объемной плотности заряда (в) вдоль разрядного промежутка при  $T_0=1400\text{ K}$ ,  $U=300\text{ В}$  (1-без порошка,  $I=0.009\text{ mA}$ ; 2 при  $d=0,3-0,5\text{ мм}$ ,  $I=0.15\text{ mA}$ ; 3 при  $d=0,15-0,3\text{ мм}$ ,  $I=0.3\text{ mA}$ )

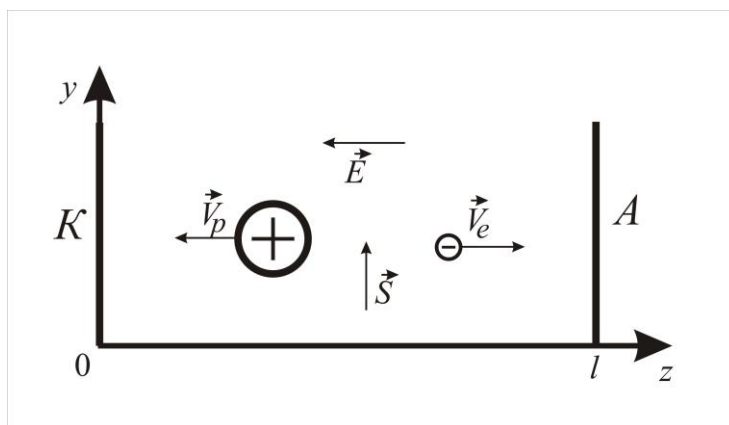


Рис.8.  $K$ - катод,  $A$ - анод.

Поскольку температура потока не высокая термоэлектронной эмиссией из катода можно пренебречь. Следовательно,

$$n_e(0)=0, j_e(0)=0 \text{ и } j(0)=j_p(0).$$

Аналогично,

$$n_p(l)=0, j_e(l)=0 \text{ и } j(l)=j_p(l),$$

где  $n_e$  - концентрация электронов,  $j_e$  - плотность электрического тока электронов,  $n_p$  - концентрация пылевых частиц,  $j_p$  - плотность электрического тока пылевых частиц и  $j$  - общая плотность электрического тока.

Стационарный разряд между катодом и анодом может существовать только в случае постоянного поступления электронов и положительно заряженных пылевых частиц за счет их движения вместе с потоком газа со скоростью  $\vec{S}$  (рис.8). Скорости движения электронов и пылевых частиц в направлении оси  $y$  могут отличаться в зависимости от расстояния от места подачи пылевых частиц в поток до места расположения электродов. С целью упрощения анализа допустим равенство их скоростей движения  $S_e = S_p = S = const$ . В этом приближении уравнения неразрывности для электронного газа и пылевых частиц записываются в виде

$$\frac{\partial(n_e V_{ez})}{\partial z} + S \frac{\partial n_e}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(n_p V_{pz})}{\partial z} + S \frac{\partial n_p}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Плотности токов определяются выражениями

$$\vec{j}_e = n_e q_e \vec{V}_e, \quad (4)$$

$$\vec{j}_p = n_p q_p \vec{V}_p. \quad (5)$$

Здесь  $q_e$  - заряд электрона,  $q_p$  - заряд пылевой частицы. Учтем известные уравнения движения заряженных частиц в электрическом поле [12]

$$\vec{V}_e = -b_e \vec{E}, \quad \vec{V}_p = b_p \vec{E},$$

где  $b_e$  и  $b_p$  подвижности электронов и пылевых частиц соответственно.

Отсюда находим

$$\vec{j} = \vec{j}_p + \vec{j}_e = q(Nn_p b_p - n_e b_e) \vec{E}, \quad (6)$$

где  $q_p = qN$ ,  $q = -q_e$ ,  $N$  - число электронов, вышедших из одной пылевой частицы. Модуль вектора плотности тока  $j$  определяется формулой

$$j = q(Nn_p b_p + n_e b_e) E \quad (7)$$

Распределение потенциала электрического поля описывается уравнением Пуассона

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (8)$$

где

$$\rho = q(N \cdot n_p - n_e). \quad (9)$$

Изменение напряженности электрического поля по сечению разряда очень мало и поэтому в (6) и (7) можно полагать  $\vec{E} = \vec{E}_z$ . В таком приближении из уравнения (8) находим

$$\frac{dE_z}{dz} = \frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0}. \quad (10)$$

На рис. 6б и 7б показаны распределения напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке. Как видно из них, величина  $E = |E_z|$  в прикатодной области I очень большая и с ростом  $z$  она сначала уменьшается, достигает минимального значения и в области II остается почти постоянной, далее в прикатодной области III снова несколько

возрастает. Сравнение графиков рис. 6б и 7б показывает рост протяженности области  $I$  с увеличением силы тока. Это объясняется тем, что здесь концентрация электронов мала и в соответствии с (7) заряд в основном переносится пылевыми частицами и  $E$  возрастает. Значения, в пределах которых меняется модуль напряженности электрического поля, представлены в таб.1.

Таб.1:

размер частиц $d, \text{ мм}$	область $I$ $ E_z , \text{ кВ/м}$	область $II$ $ E_z , \text{ кВ/м}$	область $III$ $ E_z , \text{ кВ/м}$
0,3-0,5	5-160	2-5	5 - 50
0,15-0,3	30-160	3-30	5 - 50
без порошка	5-250	2-5	5 - 30

Масса пылевой частицы  $m_p$  на много порядков больше массы электронов. Поэтому  $b_e \gg b_p$  и электроны быстро уходят из прикатодной области в сторону анода, а пылевые частицы медленно уходят из прианодной области в сторону катода. Таким образом, у катода возникает положительный объемный заряд, а у анода небольшое количество отрицательного объемного заряда (рис.7в). Этот вывод согласуется с результатом расчета, представленным на рис. 7в. Как видно, в области  $I$  имеется значительный положительный заряд и плазма не является квазинейтральной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фортон В. Е., Храпак А. Г., Якубов И. Т.* Физика неидеальной плазмы. Учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 528 с.
2. *Цытович В.Н.* Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // УФН. 1997. Т. 167. № 1. С. 57.
3. *Цытович В.Н., Винтер Д.* Пыль в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН. 1998. Т. 168. С. 899.
4. *Донской А.В., Клубникин В.С.* Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1979. 221 с.
5. *Жуков М.В., Коротеев А.С., Урюков Б.А.* Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. 298 с.
6. *Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л., Карп И.Н.* Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами. Киев: Наук. думка, 1984. 168 с.
7. *Абдуллин И.Ш., Даутов Г.Ю., Дзюба В.Л.* Электродуговые и высокочастотные плазмотроны в химико-металлургических процессах. Киев: Выща шк., 1991. – 170 с.: ил.
8. *Донской А.В., Клубникин В.С.* Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. – Л. Машиностроение, 1979. – 221 с.
9. *Решетников С.М., Бобров А.С.* Влияние расходов компонентов на эмиссионные свойства диффузионных пламен коаксальных струй. «Известия ВУЗов. Авиационная техника. 2007. №4. С. 68-69.
10. *Попов Б.Г.* Электроперенос в двухфазных (газ-твердые частицы) потках.- Инж.-физ. журн., 1978.- Т. 34. - № 1.- С.50-57.
11. *Фиалков Б.С., Захаров А.Г., Мельничук А.Ю., Хван Л.А.* Ионизация продуктов сгорания графита с добавками легкоионизируемых примесей.- Физика горения и взрыва .- 1983.- № 5.- С.119-121.
12. *Грановский В.Л.* Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. - 544 с.
13. *Капцов Н.А.* Электрические явления в газах и вакууме. М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. – 836 с.

14. *Даутов Г.Ю., Сабитов Ш.Р., Файрушин И.И.* Исследование распределений потенциала и концентраций электронов в пылевой плазме. «Вестник КГТУ», 2007 г. том 1. с.29–32.

## Аннотация

Экспериментально исследован электрический разряд в потоке смеси продуктов сгорания пропана в кислороде и порошка KCl. Получены ВАХ разряда, проведены измерения распределения потенциала и напряженности электрического поля вдоль разрядного промежутка. Выполнен анализ полученных данных и установлены основные свойства пылевой плазмы образовавшейся в данном эксперименте.

## РЕЦЕНЗИЯ

на статью Г.Ю. Даутова, Р.М. Марданшина, И.И. Файрушина и  
Т.Ф. Ашрапова

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ПОТОКЕ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ

Пылевая плазма представляет собой ионизованный газ, содержащий частицы конденсированного вещества. Пыль и пылевая плазма широко распространены в космосе. Они присутствуют в планетных кольцах, хвостах комет, в межпланетных и межзвездных облаках. Пылевая плазма обнаружена вблизи искусственных спутников Земли и космических аппаратов. В технологических процессах нанесения плёнок на поверхности деталей в поток нагретого газа специально вводятся порошки различных материалов и в результате возникает пылевая плазма.

В данной работе исследуется электрический разряд в пылевой плазме, состоящей из продуктов сгорания пропана в кислороде и частиц порошка КС1. Для генерации пылевой плазмы и ее исследования разработана экспериментальная установка.

Определены ВАХ разряда, распределения потенциала, напряженности электрического поля и объемной плотности заряда. Показано, что исследованный разряд существенно отличается от известных несомостоятельных электрических разрядов. С увеличением тока данный разряд, минуя стадии тихого самостоятельного разряда, нормального тлеющего разряда, аномального тлеющего разряда непосредственно переходит в электрического дугу. Установлено, что у катода имеет место значительные положительный объемный заряд. В качестве пожелания можно отметить необходимость расширения диапазона изменения температуры потока и расстояния между электродами в дальнейших исследованиях.

Считаю, что статью можно опубликовать в журнале «Вестник КГТУ».

докт. физ.-мат. наук, профессор,  
зав. каф. технической физики

Гайсин Ф.М.