

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Лукин Станислав Эдуардович  
КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование зависимости напряжения на дуге от соотношения расходов в  
плазмотроне двухкамерной схемы с обратной полярностью включения**

Практикум по электричеству и магнетизму, 2 курс, группа №19309

**Научный руководитель:**

м.н.с. Д. Ю. Батомункуев

Оценка научного руководителя

5 (отлично) Батомункуев

« 16 » \_\_\_\_\_ декабря \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Преподаватель практикума:**

ассистент С. Е. Краснопевцев

Оценка преподавателя практикума

отлично

« 16 » \_\_\_\_\_ декабря \_\_\_\_\_ 2020 г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

« 18 » \_\_\_\_\_ декабря \_\_\_\_\_ 2020 г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью работы являлось знакомство с принципом работы электродуговых генераторов термической плазмы (плазмотронов) и методами исследования напряжения электрической дуги в них. Для выделения информации о процессах, рассматриваемых в данной работе, из зарегистрированных в ходе эксперимента осциллограмм был составлен алгоритм отбора данных. Были оценены зависимости некоторых величин от параметра соотношения расходов в плазмотроне. Полученные данные предполагается использовать для дальнейшего исследования напряжения дуги двухкамерного плазмотрона с обратной полярностью включения, а также для разработки режимов работы плазмотрона с равномерным расходом ресурса электродов.

Ключевые слова: плазмотрон, двухкамерный, крупномасштабное шунтирование, соотношение расходов, электрическая дуга.

Работа выполнена в лаборатории № 9 института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.

## **Оглавление**

1. Введение .....	4
2. Описание экспериментальной установки .....	7
3. Методика расчётов .....	9
4. Обработка экспериментальных данных .....	11
5. Основные результаты .....	13
6. Список литературы .....	14

## 1. Введение

Плазмотроны (устройства, генерирующие низкотемпературную плазму) имеют в наше время широкое применение в различных производственных процессах, а также применяются для исследования свойств твёрдых тел в условиях обтекания потоками высокотемпературного газа.

Сейчас наиболее распространёнными являются электродуговые плазмотроны. В них плазма производится посредством нагревания газа электрической дугой. Среди электродуговых плазмотронов выделяют, в частности, линейные плазмотроны. Рассмотрим процесс генерации плазмы в двухкамерном линейном плазмотроне с прямой полярностью включения (входной электрод – катод, выходной - анод) (рис. 1).

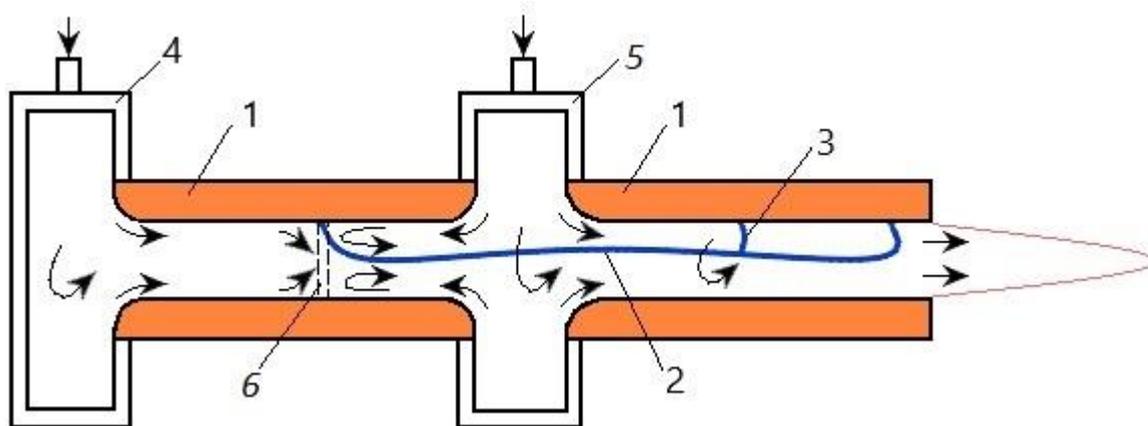


Рис. 1. Схема двухкамерного линейного плазмотрона:

1- трубчатый электрод; 2 – электрическая дуга; 3 – электрический пробой; 4 – вихревая камера; 5 – плоскость встречи газовых потоков

В вихревые камеры 4 и 5 подаётся рабочий газ. Два газовых потока из соответствующих вихревых камер встречаются в плоскости 6, положение которой определяется соотношением расходов газа в камерах. Посредством создания высокой разности потенциалов между трубчатыми коаксиальными электродами 1 происходит генерация электрической дуги 2 в газовом потоке. Так как процесс образования и горения дуги в потоке сопровождается ионизацией молекул газа и увеличением их тепловой энергии, то в результате в плазмотроне происходит генерация распределённых цилиндрических слоёв плазмы. Таким образом, на выходе плазмотрона выдувается низкотемпературная плазма. Длина потока плазмы на выходе, как правило, не велика, так как во внешней среде газ быстро охлаждается.

Так как электрическая дуга в плазмотроне порождается, в основном, ионизированными молекулами газа и эмитированными с электродов электронами, то вследствие присутствия общего газового потока дуга не горит стационарно, а смещается в сторону движения газа. При этом происходит

увеличение длины дуги посредством смещения её правого (рис.1) конца. Начальный же участок пробивания дуги находится вблизи плоскости встречи газовых потоков и, при неизменном соотношении расходов газа, практически не подвержен смещению. Это происходит из-за того, что данный слой газовой среды можно приближённо считать пространственно квазистатическим.

Напряжение дуги, очевидно, зависит от её длины. В общем виде данную зависимость можно записать как

$$U = \Delta U_э + \int_0^{l(t)} E(l)dl,$$

Здесь  $\Delta U_э$  - сумма приэлектродных падений потенциала;  $E(l)$  - напряжённость электрического поля;  $l(t)$  - длина дуги в момент времени  $t$ .

Если работать с плазмотроном постоянного тока, то можно считать  $E(l) = const$ , что следует из закона Ома. Для небольшого упрощения рассмотрим случай  $\Delta U_э \approx 0$ . Если теперь выбрать за ось  $Z$  ось симметрии электродов, направление которой соответствует среднему направлению движения газового потока, а начало помещено в левый конец дуги (рис.1), то распределение потенциала дуги вдоль  $Z$  можно записать так:

$$U(z) = U(t) - E \cdot z.$$

Здесь  $U(t)$  – напряжение дуги в данный момент времени  $t$ .

Но напряжение дуги не может всё время возрастать, а дуга - удлиняться. В нагретом газе существует и напряжение пробоя между дугой и стенкой электрода  $U_{проб}(z)$ , которое в силу неоднородности среды также зависит от  $z$ .

В какой-то момент времени  $t_0$  найдётся  $z_0$ , при котором  $U(z_0) = U_{проб}(z_0)$ . При этом в  $z_0$  происходит электрический пробой и образуется новая ветвь дуги 3 (рис. 1). Старая ветвь при этом быстро отмирает, так как имеет гораздо большее, в сравнении с новой, сопротивление. Новообразовавшаяся ветвь снова сносится потоком газа вдоль  $Z$  и процесс повторяется.

Данный периодический процесс, называемый крупномасштабным шунтированием, определяет характер зависимости напряжения дуги от времени.

Такой же процесс происходит и в двухкамерных плазмотронах с обратной полярностью включения (входной электрод – анод, выходной - катод). Причём для крупномасштабного шунтирования в случае плазмотрона с обратной полярностью включения будут верны те же математические выкладки, что были сделаны для плазмотрона с прямой полярностью включения. Отличие будет иметь лишь качественный характер: при обратной полярности включения эмитирующие с катода электроны вынуждены двигаться в направлении анода

против направления газового потока, теряя при этом часть энергии. Вследствие этого при одних и тех же расходах напряжение дуги в плазмотроне с обратной полярностью включения будет выше напряжения дуги в плазмотроне с прямой полярностью включения.

При присоединении дуги к стенке электрода происходит сильный нагрев металлической поверхности и эмиссия заряженных частиц с неё. Вследствие этого электрод постепенно разрушается.

Крупномасштабное шунтирование определяет участок выходного электрода, по которому происходит перемещение электрической дуги. Именно этот участок подвергается эрозии.

В настоящее время большой практический интерес имеет вопрос повышения ресурса электродов. Двухкамерный линейный плазмотрон выигрывает в данном вопросе у однокамерного, так как имеет возможность, посредством изменения соотношения расходов газа в вихревых камерах, регулировать положение начального крепления дуги к входному электроду. Тем самым, расходовать входной электрод возможно равномерно по его длине, что существенно увеличивает его ресурс.

Однако изменение соотношения расходов газа приводит и к изменениям параметров крупномасштабного шунтирования.

Вследствие этого, исследование напряжения электрической дуги, позволяет оценить характер расходования ресурса выходного электрода при изменении соотношения расходов газа в вихревых камерах.

До недавнего времени считалось, что в двухкамерных плазмотронах с обратной полярностью включения ресурс электродов расходуется быстрее, чем в плазмотронах с прямой полярностью включения. Однако недавние исследования опровергли данную точку зрения. Более того, было установлено, что напряжение дуги при одних и тех же токах при обратной полярности включения примерно на 15% выше, чем при прямой полярности включения. Так как эрозию электродов определяет именно величина тока, то при одинаковой скорости расходования ресурса, плазмотрон с обратной полярностью включения может вырабатывать большую мощность.

Именно исследование зависимости напряжения электрической дуги двухкамерного линейного плазмотрона с обратной полярностью включения от соотношения расходов газа в конкретном диапазоне является целью данной работы.

Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Ознакомиться с методами статистического анализа напряжения электрической дуги.

2. Зарегистрировать осциллограммы напряжения электрической дуги при различных соотношениях расходов газа.

3. Разработать алгоритм отбора нужных для анализа данных из всего массива полученных.

4. Пользуясь разработанным алгоритмом и методами статистического анализа, построить зависимость напряжения электрической дуги от соотношения расходов газа в конкретном диапазоне.

## 2. Описание экспериментальной установки

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки. Между медными трубчатыми коаксиальными электродами (анодом 3 и катодом 4) создаётся электрическая дуга 5. Electrodes are separated by an insulator 7. Working gas is fed into the vortex chambers 1 and 2 with corresponding flows  $G_1$  and  $G_2$ . The meeting of gas flows at fixed flows occurs in the plane 6.

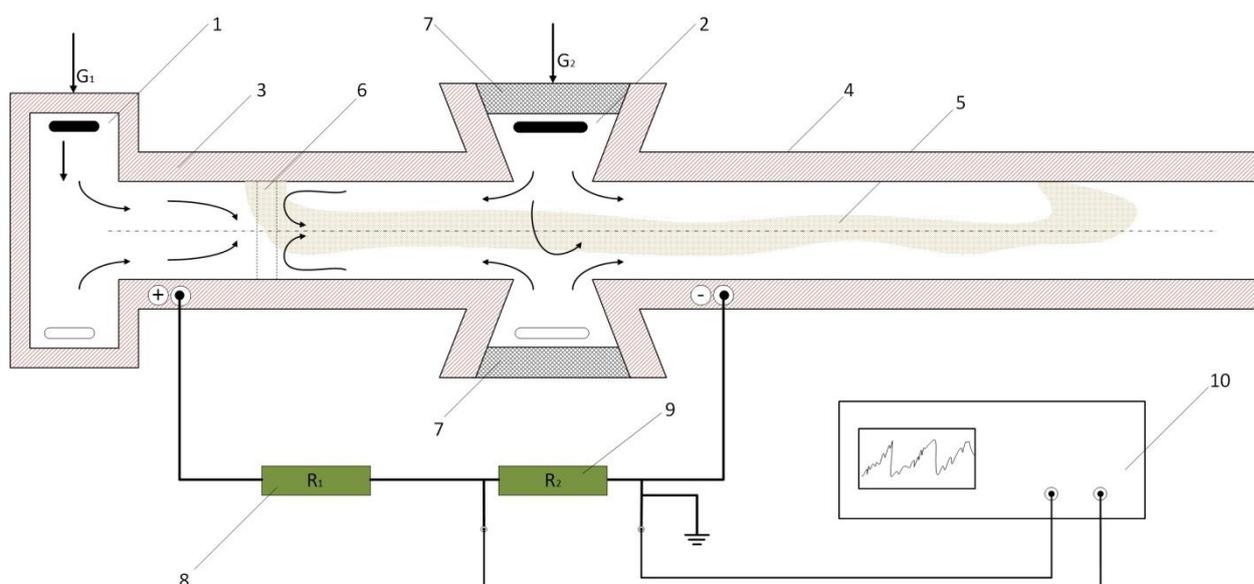


Рис. 2. Схема установки: 1 – вихревая камера с расходом газа  $G_1$ ; 2 – вихревая камера с расходом газа  $G_2$ ; 3 – анод; 4 – катод; 5 – электрическая дуга; 6 – плоскость встречи газовых потоков; 7 – изолятор; 8 – резистор с сопротивлением  $R_1$ ; 9 – резистор с сопротивлением  $R_2$ ; 10 – цифровой осциллограф В-423

Параллельно катодам подсоединяется делитель напряжения с высоким входным сопротивлением, состоящий из резисторов 8 и 9 с сопротивлениями  $R_1 = 38,48 \text{ кОм}$  и  $R_2 = 1,77 \text{ кОм}$ . Напряжение с резистора 9 снимается при помощи цифрового осциллографа 10. Данные с осциллографа в дальнейшем передаются на персональный компьютер.

Полярность включения линейного плазмотрона в данной схеме – обратная. Так как электрическая дуга образуется за счёт эмитирующих с катода

электронов и ионизируемых ими молекул газа, то полярность включения схемы оказывает влияние на характеристики дуги и характер зависимости напряжения на ней от времени.

Так как межэлектродная разность потенциалов велика (около 600 В), то для безопасной регистрации напряжения осциллографом используется делитель напряжения с коэффициентом  $K \approx 0,044$ .

Каждое измерение проводится при фиксированном значении расходов газа  $G_1$ ,  $G_2$ , а также при фиксированном значении межэлектродной разности потенциалов. Это позволяет регистрировать и анализировать напряжение на дуге в режиме стабильной работы плазмотрона.

Регистрируемый осциллографом сигнал передаётся через USB-канал на ПК, где обрабатывается при помощи программы Oscilloscope версии 2.1.0, входящей в список программного обеспечения цифрового осциллографа В-423.

Регистрация сигнала производилась в двух режимах временной развёртки: 1 мс/дел и 10 мс/дел. Так как процесс шунтирования не имеет строго постоянного характера, дальнейший анализ данных опирается на статистическую обработку.

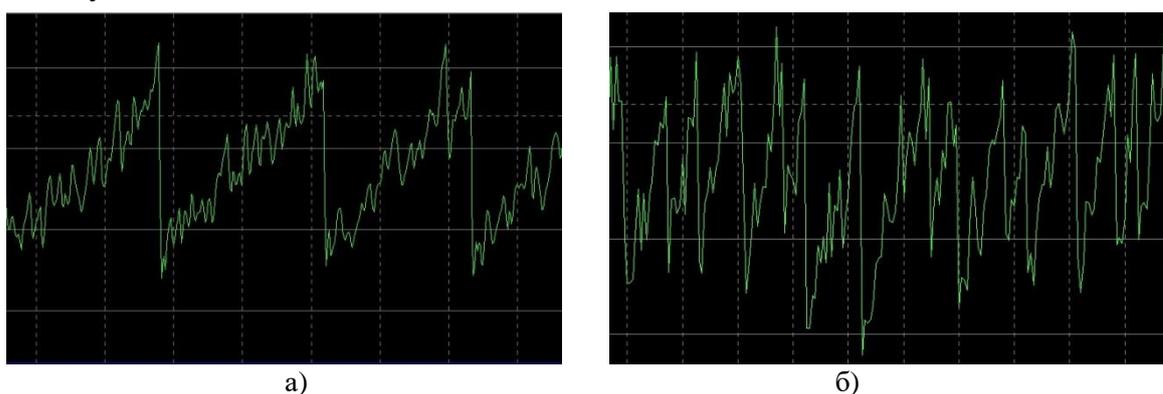


Рис. 3. Примеры осциллограмм: а) – осциллограмма при регистрации сигнала в режиме временной развёртки 10 мс/дел; б) – осциллограмма при регистрации сигнала в режиме временной развёртки 1 мс/дел.

На рис. 3 приведены примеры типичных осциллограмм, получаемых при регистрации сигнала. На осциллограмме “а” можно заметить, что процесс крупномасштабного шунтирования сопровождается так называемым мелкомасштабным шунтированием (пробой между ветвями электрической дуги, между концом дуги и электродом и т. п.). С практической точки зрения, изучение мелкомасштабного шунтирования не так интересно, как изучение крупномасштабного, так как факторы, определяющие данный процесс, сказываются на расходовании ресурса электродов слабо.

Поэтому, чтобы отсеять большое количество данных связанных с процессом мелкомасштабного шунтирования, осуществлялась регистрация сигнала в режиме временной развёртки 10 мс/дел (осциллограмма “б”). В данном режиме

осциллографом сглаживалось большое количество слабых относительно крупномасштабного шунтирования неоднородностей.

При этом при сопоставлении прямых данных о частоте, было выявлено, что относительное отклонение автоматического расчёта средней частоты сигнала программой Oscilloscope в режиме регистрации 10 мс/дел от среднего значения частоты крупномасштабного шунтирования, определяемого по данным из осциллограмм типа “б” находится в допустимых пределах (5-12%).

### 3. Методика расчётов

Так как газовая дуга образуется в плазмотроне в турбулентном газовом потоке, то её аналитическое описание крайне затруднительно из-за невозможности точно математически смоделировать процессы изменения разрядной среды. По этой причине в данной работе сделан упор на статистический анализ полученных данных.

Так как программа Oscilloscope, входящая в программное обеспечение цифрового осциллографа В-423, позволяет рассчитать только усреднённые и амплитудные параметры снятого сигнала, в ходе работы возникла потребность в разработке программы для выделения из общего массива данных осциллограммы ряда данных, связанных только с процессом крупномасштабного шунтирования.

С этой целью была написана программа на языке Python. Данные о сигнале экспортировались в файл “IN.txt”, из которого считывались программой для анализа.

Таким образом, на обработку программой поступало около 1024 точек, соответствующих определённым значениям напряжения.

Далее программой производились последовательно следующие действия:

1. Вычислялось минимальное значение выборки, обозначавшееся как нулевой уровень ( $U_0$ ).

2. Из всего массива данных выбиралась пары двух последовательных точек ( $U_i$  и  $U_{i+1}$ ), удовлетворяющих условию  $\frac{U_{i+1}-U_0}{U_i-U_0} < 0,7$ . В силу природы мелкомасштабного шунтирования, колебания напряжения, связанные с этим процессом по размаху составляют не более 20-30% в отношении к размаху колебаний, связанных с крупномасштабным шунтированием. Поэтому данное условие позволяет рассмотреть только ряд точек, описывающих процесс крупномасштабного шунтирования.

3. Значения  $U_i$  и  $U_{i+1}$ , удовлетворившие условию, делятся на коэффициент подобия делителя напряжения  $K$  (в данной работе  $K = 0,044$ ) и записываются соответственно в массивы максимальных ( $U_{max}$ ) и минимальных ( $U_{min}$ )

значений напряжения при каждом акте шунтирования. Их разность  $U_\delta = U_i - U_{i+1}$  записывается в массив напряжений пробы, соответствующих каждому акту шунтирования.

4. Полученные выборки данных выводятся в файл "OUT.txt" в виде трёх последовательных столбцов для возможности повторного считывания и экспорта их в Excel.

По полученным данным находились такие величины, как среднее значение по выборке и среднее квадратичное отклонение выборки по соответствующим формулам:

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n U_i \qquad \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n}}$$

Для первичного анализа распределения значений  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  и  $U_\delta$  выполнялось построение соответствующих нормированных гистограмм (в которых автоматически была выполнена нормировка), которые позволяли произвести визуальную оценку отличия распределения величин от нормального.

Так как анализ данных для линейного однокамерного плазматрона с прямой полярностью включения показывает существование двух режимов шунтирования, переход между которыми происходит при изменении расхода газа в камере, была целесообразна попытка обнаружения подобного перехода в двухкамерном плазматроне с обратной полярностью включения.

С этой целью производился сравнительный анализ полученных гистограмм, а также вычисление коэффициента корреляции между каждой парой величин по формуле

$$K_{1,2} = \frac{\sum_{j=1}^n (U_{1j} - \bar{U}_1) \cdot (U_{2j} - \bar{U}_2)}{\bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2 \cdot n}$$

Так описанные величины связаны между собой, то при протекании переходного процесса должно происходить увеличение коэффициента корреляции между какой-нибудь парой их.

#### 4. Обработка экспериментальных данных

Эксперимент проводился для двухкамерного плазматрона с медными электродами. В течение всего эксперимента поддерживался постоянный ток электрической дуги, равный 225 А. Осциллограммы снимались для напряжения при стабилизовавшемся режиме работы плазматрона.

Данные о напряжении на дуге снимались при фиксированной величине общего расхода газа (18 г/с). В вихревой камере, находящейся у начала анода,

величина расходов газа изменялась в пределах  $5 - 9 \text{ г/с}$ . Величина расходов газа камере, находящейся между электродами, изменялась в пределах  $9 - 13 \text{ г/с}$ . Таким образом, коэффициент соотношения расходов  $g$  изменялось в пределах от 1 до 2,6. Данный диапазон был выбран из соображений безопасности эксплуатации плазмотрона. При больших или малых значениях  $g$  плоскость встречи газовых потоков может сместиться в сторону одной из вихревых камер достаточно сильно для фиксации одного из концов дуги на границе камеры или даже внутри неё. Горение же дуги в вихревой камере или на её границе быстро приведёт к неисправности установки.

Из полученных данных с помощью программы Oscilloscope извлекалась частота шунтирования и записывалась в таблицу Excel. Далее данные обрабатывались при помощи программы, описанной ранее, и экспортировались в Excel для расчёта среднего значения и среднеквадратичного отклонения по выборкам. Также рассчитывались коэффициенты корреляции между каждой парой выборок.

После этого строились графики, отображающие зависимость данных величин от соотношения расходов газа в вихревых камерах.

На рис. 4 приведены построенные по обработанным данным графики. График “А” зависимости частоты шунтирования  $f$  от соотношения расходов  $g$  имеет на исследуемом участке довольно интересный вид. Можно заметить ряд точек с высокой частотой, большинство из которых близки к значению  $1275 \text{ Гц}$ . Переход между такими точками на графике сопровождается резким снижением регистрируемой частоты шунтирования.

На графике “Б” отображены зависимости коэффициентов корреляции между  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  и  $U_{\delta}$  от  $g$ . На графике видны участки относительного постоянства коэффициентов корреляции, а также всплески значений коэффициентов в отдельных точках.

На графике “В” отображены зависимости средних значений  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  и  $U_{\delta}$  от  $g$ , а также среднеквадратичное отклонение каждой величины в соответствующей точке. Из графика можно сделать вывод, что  $\overline{U_{max}}$ ,  $\overline{U_{min}}$  и  $\overline{U_{\delta}}$  являются практически постоянными величинами на исследуемом участке и не зависят от  $g$ . Флуктуации значений наблюдаются на начальном участке  $g$  и не являются существенными по величине. Среднеквадратичное отклонение всех трёх величин при этом довольно велико. Наиболее резко это наблюдается на графике  $U_{\delta}(g)$ .

В целом, большое значение среднеквадратичного отклонения можно считать следствием недостаточного размера выборок данных.

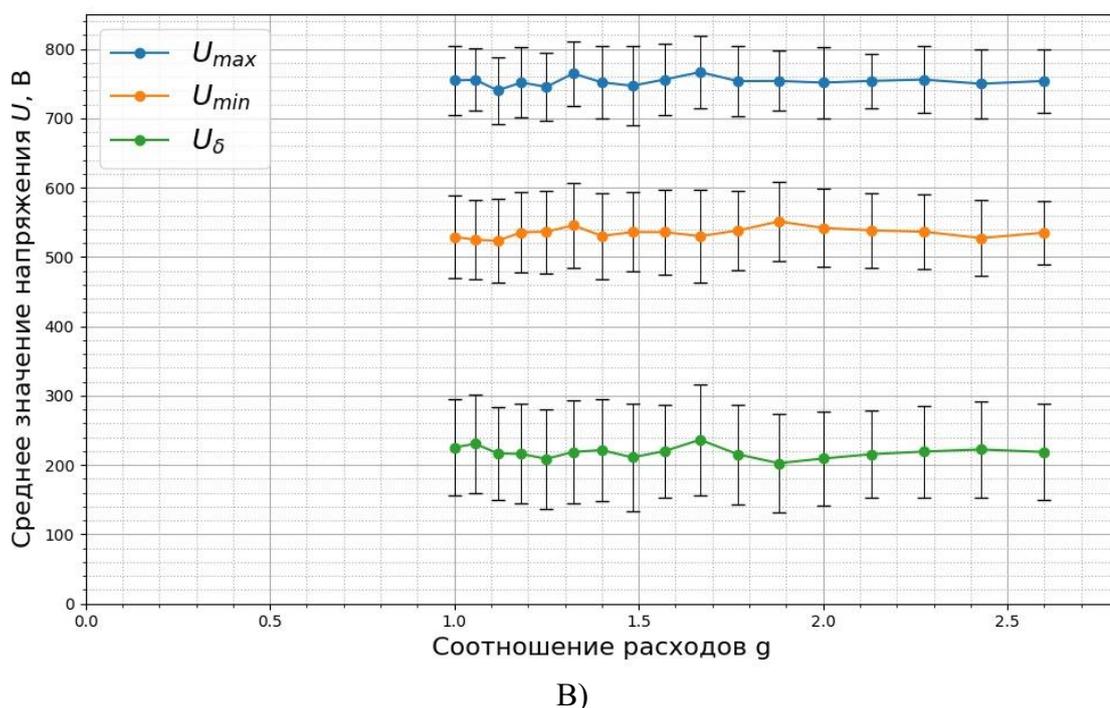
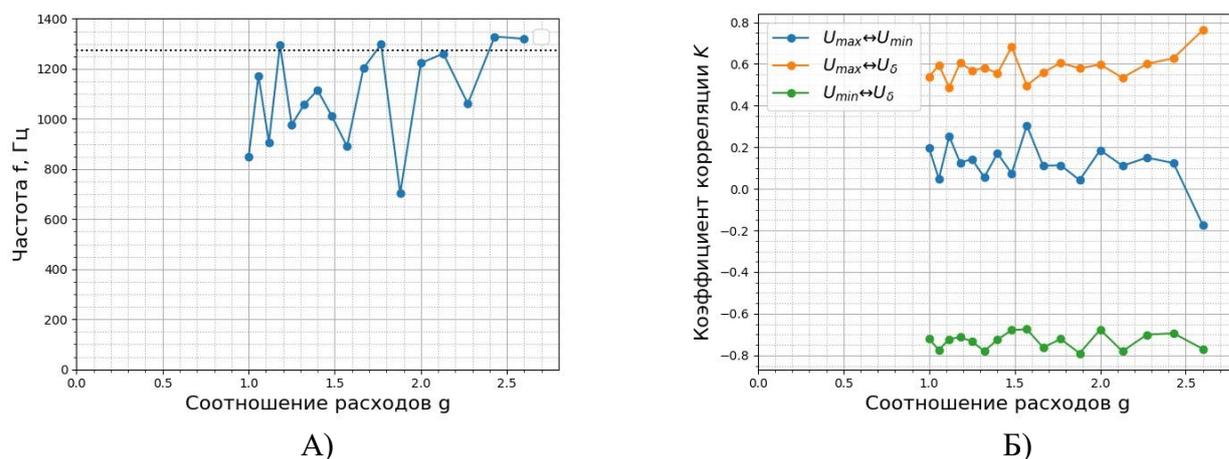


Рис. 4. Графики зависимости от соотношения расходов газа: А) – частоты шунтирования; Б) – коэффициентов корреляции между  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  и  $U_{\delta}$ ; В) – средних значений  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  и  $U_{\delta}$

Необычное поведение регистрируемой частоты при изменении  $g$  может быть связано с наличием переходных процессов между принципиально разными режимами шунтирования (если два режима присутствуют при каком-то значении  $g$  одновременно, это затрудняет регистрацию частоты). На это косвенно намекает увеличение по модулю некоторых коэффициентов корреляции в точках резкого снижения частоты, а также вид распределений значений  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  и  $U_{\delta}$  в этих точках.

На рис. 5 “А” - “В” приведены графики распределения значений  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  и  $U_{\delta}$  в выборках при некоторых соотношениях расходов газа  $g$ . Сразу видна небольшая асимметрия распределения. “Двугорбость” распределений выражена почти во всех распределениях слабо, но всё-таки присутствует (это можно

легко заметить на графике “В”), что может говорить о присутствии переходного процесса при некоторых значениях  $g$ .

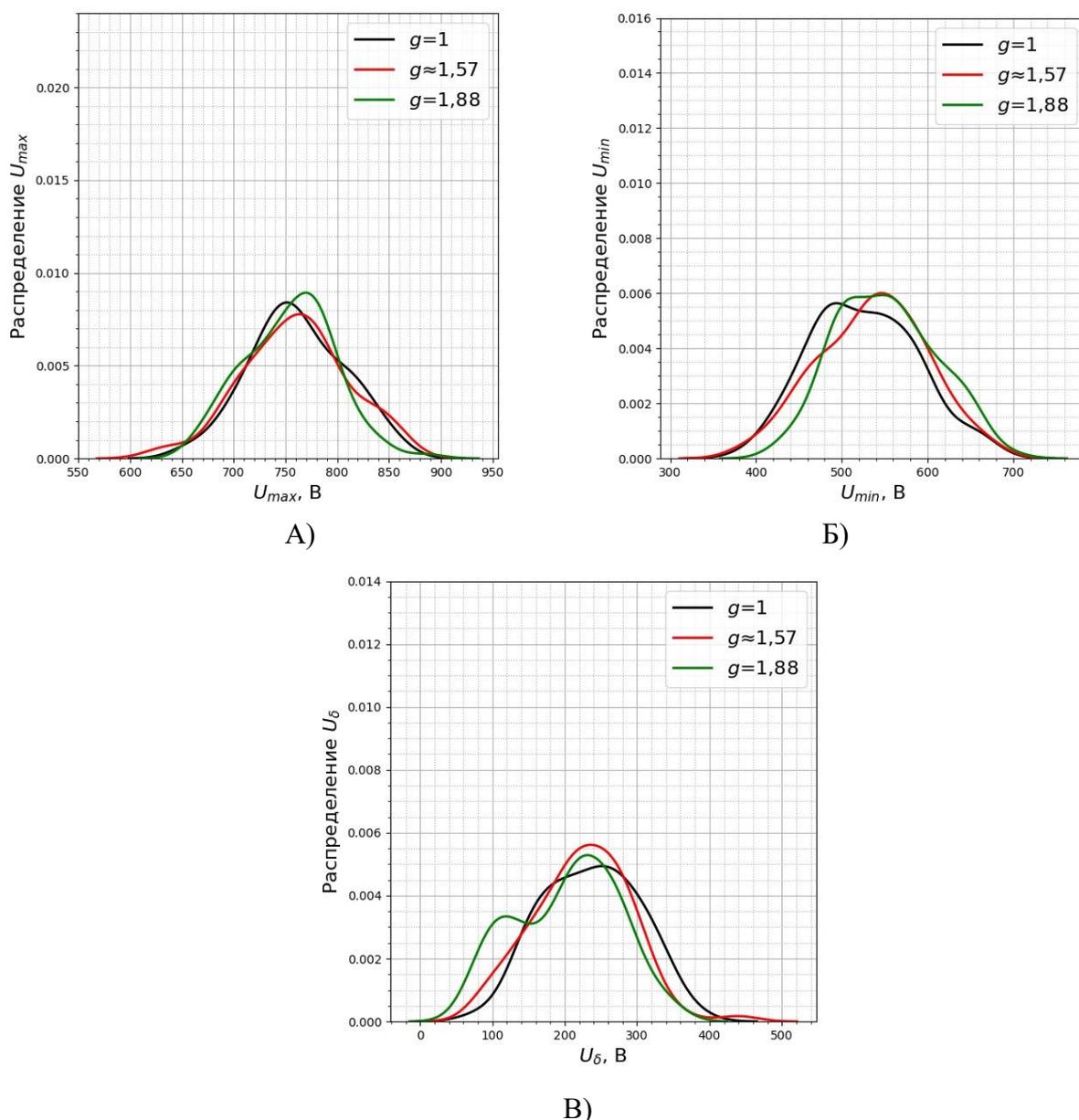


Рис. 5 . Графики распределения значений  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  и  $U_\delta$  в выборках при различных соотношениях расходов газа  $g$ : А) –  $U_{max}$ ; Б) –  $U_{min}$ ; В) –  $U_\delta$

Однако о точных выводах говорить нельзя в силу большого значения среднеквадратичного отклонения величин.

## 5. Основные результаты

В ходе работы было произведено ознакомление со статистическими методами анализа значений напряжения на электрической дуге плазмотрона. Разработан алгоритм выделения ряда полезных данных о процессе крупномасштабного шунтирования из всего массива полученных данных и написана программа для его реализации. Получены и обработаны данные о

напряжении на электрической дуге в диапазоне соотношения расходов 1,5-3 при фиксированном токе. Выдвинуто предположение о возможности существования выраженных переходных процессов. Полученные в данной работе результаты предполагается использовать для дальнейшего изучения напряжения дуги, а также для разработки режимов работы плазмотрона с равномерным расходом ресурса выходного электрода.

## **6. Список литературы**

1. Жуков М. Ф., Засыпкин И. М., Тимошевский А. Н., Михайлов Б. И., Десятков Г. А. Низкотемпературная плазма Т. 17 Электродуговые генераторы термической плазмы/ Новосибирск: Наука. Сиб. предпр. РАН, 1999. 712 с.

2. Колонина Л. И., Урюков Б. А. Определение начала зоны взаимодействия электрической дуги, стабилизированной закрученным потоком газа, с пристенным пограничным слоем // Изв. Сиб. отд-ния АН СССР. – 1968. № 13. – Сер. техн. наук, вып. 3. – с. 23-25.

3. Колонина Л. И., Урюков Б. А. Напряжённость электрической дуги в области взаимодействия с турбулентным пограничным слоем в плазмотроне с вихревой стабилизацией // Изв. Сиб. отд-ния АН СССР. – 1968. № 13. – Сер. техн. наук, вып. 3. – с. 28-32.