

График 5.2 ( $g(t) = 45$ ) – Двухмерный график численного решения задачи оптимальной температуры в теплице

*Список использованных источников:*

1. М. Рахимов, Оптимальное моделирование процессов теплопередачи и колебаний. Методы динамического программирования и спектрального разложения, научная монография, LAP, LAMBERT Academic Publishing, ISBN:978-620-3-30910-2.

**Веремейчик А. И., Парфиевич А. Н., Томашев И. Г., Сазонов М. И.,  
Хвисевич В. М.**

### **РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ**

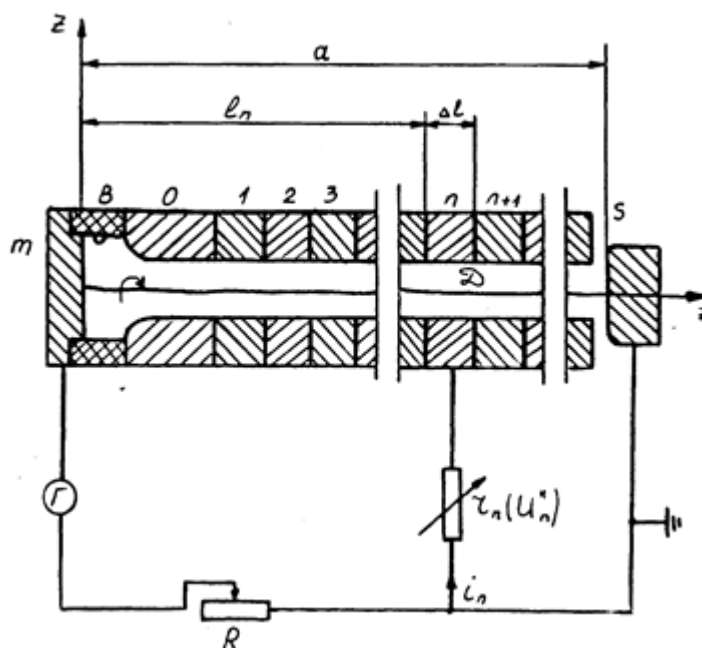
*Брестский государственный технический университет. кафедра прикладной механики*

**Введение.** Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны) широко применяются для стационарного нагрева газовых сред до состояния низкотемпературной плазмы 10000 К. Использование их в промышленных технологиях обеспечило разнообразие конструктивных решений плазменных устройств. Энергетические и электрофизические характеристики плазмотронов определяются главным образом геометрическими и газодинамическими параметрами разрядной камеры [1–8]. Генераторы кислородной плазмы находят применение в металлургии, химической промышленности, например, получение двуокиси титана и озонирование, а также могут применяться для получения озона в различных областях.

**Методика теоретических и экспериментальных исследований.** С целью получения исходных данных для моделирования и разработки плазмотрона,

предназначенного для производства озона, были проведены исследования напряженности электрического поля дуги, горящей в кислороде. Характер горения определяется скоростью обтекания дуги газом. Как известно, при числе Рейнольдса  $Re < 2000$  дуга горит в ламинарном потоке газа, а при  $Re > 2000$  горение дуги реализуется в турбулентном потоке. Режимы обтекания дуги сильно влияют на процессы преобразования электрической энергии в тепловую.

Исследования дуги проводились на экспериментальном плазмотроне с фиксированной длиной дуги и геометрически подобными электроразрядными камерами, причем внутренним электродом служил циркониевый катод диаметром 2 мм, заделанный заподлицо в медную обойму.



s, m – электроды, 1, 2, 3, ... ,n, n+1 – секции вставки, Г – источник электропитания, R – балластное сопротивление

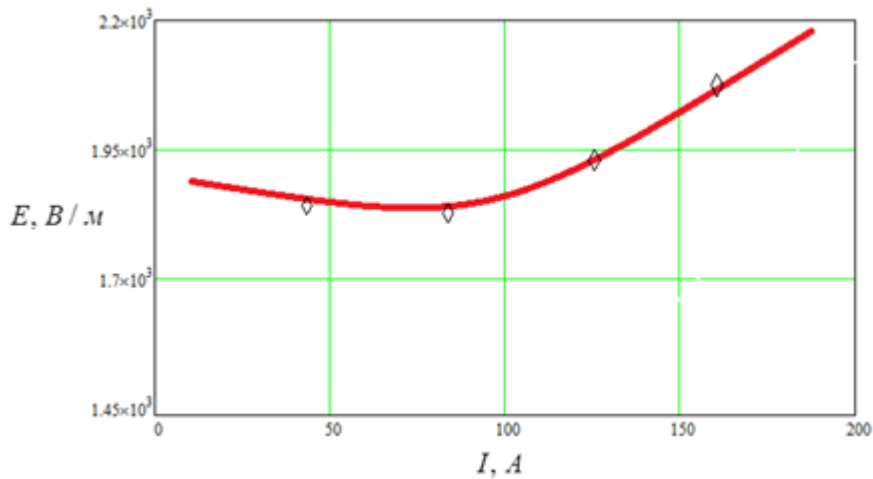
Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Напряженность электрического поля вдоль дуги  $E_H$  определена методом измерения потенциалов изолированных друг от друга секций [4]. Напряженность электрического поля дуги определялась по наклону кривой распределения потенциала вдоль оси  $z$ . Диапазон изменения параметров при исследовании дуги в кислороде указан в таблице 1.

Таблица 1 – Диапазон изменения параметров при исследовании дуги в кислороде

Диаметр разрядной камеры $d$ , м	0,01	0,02	0,03
Толщина секции $\Delta l$ , м	0,0105	0,011	0,0206
Длина камеры $a$ , м	0,154	0,252	0,358
Ток $I$ , А	30–180	30–180	30–180
Расход кислорода $G$ , г/с	2–4	2–4	2–4

На рисунке 2 изображена типичная зависимость напряженности электрического поля дуги от тока  $I$  при расходе газа  $G = 4$  г/с.



Рисисунок 2 – Напряженность электрического поля дуги в потоке кислорода при  $d = 0,01$  м,  $G = 4$  г/с

На основе теории подобия разработана методика расчета плазмотронов для нагрева кислорода. Учитывая особенности горения дуги в кислороде, обобщенную зависимость напряженности электрического поля от основных критериев будем искать в виде

$$E_H = c \left( \frac{G}{d} \right)^\beta (pd)^\gamma \left( c_0 + c_1 \frac{I}{d} + c_2 \frac{I^2}{d^2} \right), \quad (1)$$

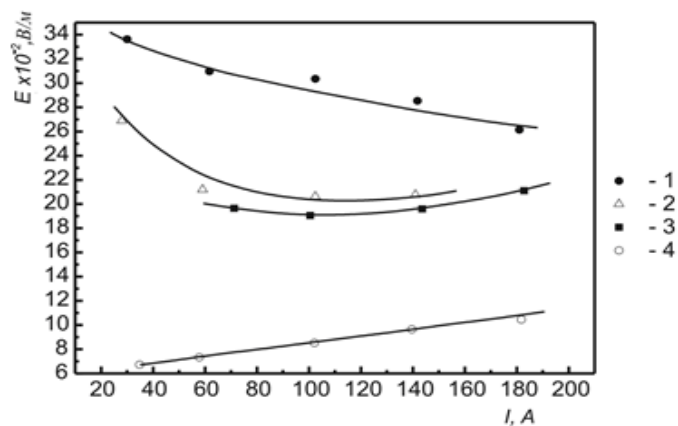
где  $c, \beta, r, c_0, c_1, c_2$  – вариационные константы,  $p$  – давление газа.

Путем обработки результатов экспериментов и их обобщения получена следующая критериальная формула для расчета  $E_H$  дуги в потоке кислорода [11]

$$E_H = 3,17 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{G}{d} \right)^{0,15} \cdot (pd)^{0,13} \cdot \left( 347 - 1 \cdot 10^{-2} \frac{I}{d} + 9,26 \cdot 10^{-2} \frac{I^2}{d^2} \right). \quad (2)$$

Размерности величин в этой формуле следующие:  $E$  – В/м,  $G$  – кг/с,  $I$  – А,  $d$  – м,  $p$  – Па. На основе формулы (2) выполнен расчет вольт-амперных характеристик (ВАХ) плазмотрона.

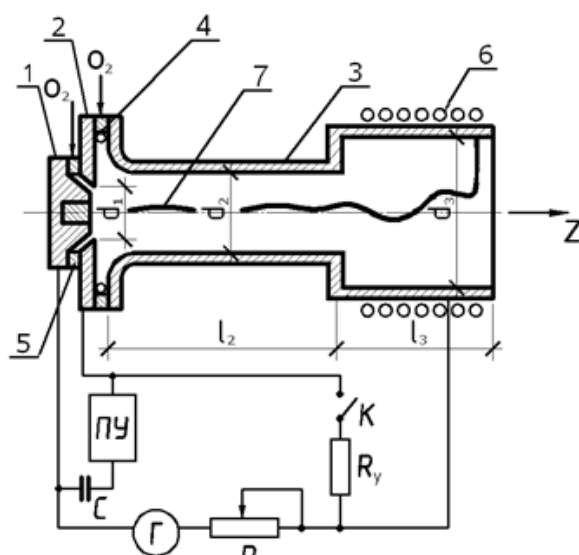
Для сравнения электрического поля вдоль дуги в вихревых потоках различных газов проведены исследования вольт-амперных характеристик дуги [4, 5]. На рисунке 3 приведены вольт-амперные характеристики дуги для различных газов при  $d = 0,01$  м,  $G = 4$  г/с.



1 – гелий, 2 – азот, 3 – воздух, 4 – аргон

Рис. 3 – Напряженность электрического поля дуги для различных газов

На основе разработанной методики с использованием критериальной формулы (2) разработан и сконструирован плазмотрон. Схема плазмотрона, его электропитания и поджига приведена на рисунке 4. Основными элементами плазмотрона являются циркониевый катод 1, поджигающий электрод 2 и ступенчатый анод 3. Поджигающий электрод выполнен из меди в виде секции-шайбы с внутренним диаметром  $d_1 = 16$  мм. Медные ступенчатые аноды имели диаметры  $d_2 = 8$  мм и  $d_3 = 16$  мм, длину  $l_2 = 30-50$  мм. Длина анода  $l = l_2 + l_3$  изменялась от 90 до 150 мм. Для уменьшения эрозии рабочей поверхности анода установлен навитый из медной трубки соленоид 6. Создаваемое им осевое магнитное поле (0,06 – 0,08 Тл), обеспечивает такие скорости вращения замыкающего радиального участка дуги, при которых ресурс работы анода достигает свыше 1000 часов. Катод, поджигающий электрод, анод и соленоид интенсивно охлаждаются химически очищенной водой. Вода подается в систему охлаждения плазмотрона под давлением 10–15 атм. Для расчета тепловых потоков в электроды определяли температуру воды на входе и выходе из плазмотрона при помощи хромель-копелевых термопар с записью показаний прибором ЭМП – 109 АИ.



1 – катод, 2 – поджигающий электрод, 3 – анод, 4, 5 – изоляторы, 6 – соленоид, 7 – дуга  
Рисунок 4 – Схема плазмотрона и электропитания

Давление кислорода перед расходомерами на входе плазмотрона составляло  $(4...8) \cdot 10^5$  Па. Расход газа измерялся приборами типа ПВ–1033, а его плавная регулировка осуществлялась автоматическими приборами типа ДМПК–100. В зазор между катодом и поджигающим электродом через 2 тангенциальных отверстия диаметром 1,2 мм, расположенных в кольце закрутки с внутренним диаметром 50 мм, подавался кислород (расход 0,1 – 0,2 г/с). Во вторую камеру закрутки, расположенную между поджигающим электродом и анодом, газ поступал через 4 тангенциальных отверстия диаметром 2,4 мм, расположенных в кольце закрутки с внутренним диаметром 64 мм. Суммарный расход кислорода варьировался от 0,5 до 2,4 г/с.

Электропитание плазмотрона осуществлялось от источника питания с номинальным током 600 А и напряжением 900 В. Т.к. его внешняя электрическая характеристика жесткая, а ВАХ дуги падающая из-за неустойчивого горения дуги, в силовую цепь последовательно с дугой с целью обеспечения устойчивого ее горения включено изменяющееся ступенчато балластное сопротивление  $R$ . Поджиг плазмотрона осуществлялся при помощи высоковольтного высокочастотного осциллятора с подачей напряжения на поджигающий электрод 3. Между

поджигающим электродом и анодом через контактор включено сопротивление  $R_y=10-20$  Ом. Такая схема включения осциллятора в электрическую цепь питания плазмотрона позволяла исключить попадание ВЧ-напряжения в силовую цепь питания и обеспечивала тем самым надежную защиту выпрямителя от перенапряжения. Соленоид 6 включен в цепь электропитания последовательно с дугой.

Запуск плазмотрона осуществляется в следующем порядке: устанавливают рабочий расход кислорода; после этого при включенном контакторе  $K$  подают напряжение от выпрямителя  $G$  и далее включается осциллятор, обеспечивающий пробой зазора (1,5 мм) между катодом и поджигающим электродом. Образовавшийся искровой канал служит основой для развития вспомогательной дуги, ток которой равен 10–15 А и регулируется изменением величины  $R_y$ . Под действием потока газа слабощадная дуга выдувается из зазора. Катодное пятно устанавливается на катоде, анодное - перемещается к кромке электрода 2, а образующийся высокотемпературный факел снижает напряжение пробоя между катодом и анодом; существующая разность потенциалов между ними обеспечивает пробой и поджиг основной дуги. Ток в основной цепи регулируется балластным реостатом  $R$ . Далее радиальный участок дуги потоком газа, подаваемого в основную вихревую камеру, сносится за уступ, а столб дуги устанавливается на оси разрядной камеры. После запуска плазмотрона сопротивление  $R_y$  отключают контактором  $K$ , а реостатом  $R$  устанавливается и стабилизируется необходимый рабочий ток силовой дуги. Запуск плазмотрона производится при токе дуги 200–300 А.

Проведены исследования ВАХ плазмотрона. Результаты экспериментов подтвердили необходимость поддержания тангенциальной скорости закрутки кислорода и плавного (безотрывного) перехода от кольца закрутки к внутреннему диаметру электрода с целью обеспечения газодинамически устойчивого горения дуги. В экспериментах также было установлено, что дуга в плазмотроне рассматриваемой схемы горит с меньшими пульсациями напряжения по сравнению с дугой с самоустанавливающейся длиной, горящей в цилиндрическом канале без уступа.

Одновременно с исследованием вольт-амперных характеристик дуги проводились измерения тепловых потоков в элементы плазмотрона: катод, анод и поджигающий электрод. Это позволило вычислить тепловой к.п.д. плазмотрона, энтальпию и среднemasсовую температуру  $T$  газа в зависимости от величины тока дуги и длины анода при различных расходах газа. Установлено, что тепловой к.п.д. равен 0,6–0,7, а рассчитанная температура достигает 4200 К. В таблице 2 приведены основные технические характеристики разработанного плазмотрона.

Таблица 2 – Технические характеристики плазмотрона

№ п/п	Параметр	Характеристика
1.	Мощность плазмотрона, кВт	до 30
2.	Рабочий газ	кислород
3.	Род тока	постоянный
4.	Ток дуги, А	до 140
5.	Расход кислорода, г/с	до 3,2
6.	Давление газа на входе в плазмотрон, Па	$5 \cdot 10^5$
7.	Охлаждение	водяное
8.	Тепловой к.п.д.	0,6–0,7
9.	Ресурс катода, час	7
10.	Ресурс анода, час	200
11.	Расход воды на охлаждение, г/с	60
12.	Габаритные размеры, мм	125×250
13.	Масса, кг	0,9

**Заключение.** Проведены исследования напряженности электрического поля дуги, горящей в кислороде. Выполнен расчет ВАХ плазмотрона с использованием полученной эмпирической формулы для расчета напряженности электрического поля дуги. На основе созданной методики разработана оригинальная конструкция и сконструирован генератор низкотемпературной плазмы кислорода, определен тепловой к.п.д. плазмотрона, энтальпия и среднемассовая температура газа в зависимости от определяющих параметров при различных расходах кислорода. Полученные экспериментальные данные и инженерные решения могут служить исходными для проектирования промышленных плазменных установок различной мощности.

*Список использованных источников:*

1. Жуков, М. Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М. Ф. Жуков, А. С. Коротеев, Б. А. Урюков. – Новосибирск: «Наука» СО АН. – 1975. – 299 с.
2. Даутов, Г. Ю. Напряженность электрического поля в стабилизированной вихревой дуге / Г. Ю. Даутов, М. И. Сазонов. – ПМТФ, № 4, 1967. – С. 127–131.
3. Бублиевский, А. Ф. Критериальные зависимости для безрасходных электрических дуг в канале / А. Ф. Бублиевский // ИФЖ. – 1997. – Т. 70, № 1. – С. 99–104.
4. Веремейчик, А. И. Исследование электрической дуги в потоке гелия в сильноточном плазмотроне / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, Д. Л. Цыганов // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 5. – С. 99–102.
5. Батрак, В. В. Исследование электрической дуги в потоке аргона / В. В. Батрак, А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 4 : Машиностроение. – С. 26–28.
6. Жуков, М. Ф. Электродуговые генераторы термической плазмы / М. Ф. Жуков, И. М. Засыпкин, А. Н. Тимошевский. – Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. – 712 с.
7. Разработка генератора низкотемпературной плазмы с расширяющимся каналом и некоторые его применения: дис. в виде науч. докл. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук: 01.02.05; 05.16.01 / Исакаев М.-Э. Х. – М., 2002. – 89 с.
8. Радько, С. И. Устройство электродугового плазмотрона и моделирование его энергетических характеристик С. И. Радько, Э. К. Урбах // Доклады ТУСУРа, № 1 (25). Ч. 1. – 2012. – С. 212–215.
9. Гаджиев, М. Х. Мощный генератор низкотемпературной плазмы воздуха с расширяющимся каналом выходного электрода / М. Х. Гаджиев, Э. Х. Исакаев, А. С. Тюфтяев, Д. И. Юсупов. – Письма в ЖТФ, 2016, т. 42, вып. 2. – С. 44–49.
10. Rutberg Ph. G., Bratsev A. N., Safronov A. A. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. – V. 30, № 4. – P. 1445–1448.
11. Высокопроизводительный плазменный генератор для процесса озонирования сточных вод / А. И. Веремейчик [и др.] // Перспективные методы очистки природных и сточных вод : сборник статей региональной научно-технической конференции, Брест, 26 сентября 2019 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Кафедра водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ; редкол.: С. Г. Белов [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2019. – С. 60–63.