

УДК 378.14;537.77

**Ткачева Татьяна Михайловна**, канд. физ.-мат. наук, доц.,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, tmtkach@rambler.ru

**Илюшечкин Андрей Иванович**, студент,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, streletca@mail.ru

**Новгородов Данила Алексеевич**, студент,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, dnovogorodov@gmail.com

**Лычаков Георгий Ильич**, студент,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, georgghost@mail.ru

**Юдин Денис Александрович**, студент,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, denis.yudin.qaz@gmail.com

**Терехов Дмитрий Александрович**, студент,  
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, dmitriyterehov99@gmail.com

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ЗАЖИГАНИЯ**

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследования параметров высоковольтной электрической дуги (ВЭД), выполненные на собранной в лаборатории установке, в зависимости от условий горения ВЭД в разных газовых средах, при разном давлении, в магнитном поле и в пламени свечи. Показано, что газовая среда влияет на время зажигания ВЭД и стабильность ее горения. Наибольшая стабильность горения и наименьшее время зажигания ВЭД наблюдается при пониженном давлении. В инертном газе выявляется длительная стабильность горения, однако время зажигания становится больше, чем при пониженном давлении. Для газовых смесей наименьшее время зажигания ВЭД соответствует присутствию кислорода в газовой среде. Магнитное поле, наложенное на ВЭД, выявляет отклонение дуги к одному из полюсов магнита, что доказывает электромагнитную природу ВЭД. Пламя свечи увеличивает количество плазменных вспышек. В статье приведены области применения ВЭД.

**Ключевые слова:** высоковольтная электрическая дуга (ВЭД); время зажигания; время стабильного горения; газовая среда магнитное поле; давление в сосуде; пламя свечи.

**Tkacheva Tatiana M.**, Ph. D., associate professor,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, tmtkach@rambler.ru

**Ilyushechkin Andrei I.**, student,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, streletca@mail.ru

**Novogorodov Danila A.**, student,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, dnovogorodov@gmail.com

**Lychakov Georgii I.**, student,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, georgghost@mail.ru

**Yudin Denis A.**, student,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, denis.yudin.qaz@gmail.com

**Terehov Dmitrii A.**, student,  
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, dmitriyterehov99@gmail.com

## STUDY OF HIGH VOLTAGE ELECTRIC ARC IN DIFFERENT IGNITION CONDITIONS

**Abstract.** The article presents the results of a study of the parameters of High-voltage Electric Arc, performed on the assembled in the laboratory installation. It is a study of these parameters dependence on the conditions of High-voltage Electric Arc combustion in different gas media, at different pressures, in the magnetic field and in the candle flame. It is shown that the gas medium affects the ignition time of the High-voltage Electric Arc and the stability of its combustion. The greatest stability of combustion and the shortest ignition time of High-voltage Electric Arc are observed at reduced pressure. In inert gas, the combustion stability is also quite long, however the ignition time is longer than at reduced pressure. For gas mixtures, the shortest ignition time of High-voltage Electric Arc corresponds to the presence of oxygen in the gas medium. The magnetic field superimposed on the High-voltage Electric Arc reveals the arc deviation to one of the poles of the magnet, which proves the electromagnetic nature of the High-voltage Electric Arc. The flame of the candle increases the number of plasma flashes. The article presents the scope of High-voltage Electric Arc.

**Key words:** the High-voltage Electric Arch; ignition time; time of stable burning; the gas environment magnetic field; pressure in a vessel; a candle flame.

### Введение

Высоковольтная электрическая дуга известна, начиная с 19 века. К настоящему времени известно, что электрическая дуга представляет собой плазму, возникающую под воздействием электрического разряда в газовой среде [3]. При подведении высокого напряжения между электродами возникает пробой. Напряжение выбирают в соответствии с имеющимися возможностями, а также с учетом работы выхода электронов из металлов. Возникновению ВЭД способствует приближение электродов друг к другу. Между ними возникает искровой разряд, который при достаточной мощности источника напряжения превращается в плазменный шнур. Это явление используют для проведения газосварочных работ [4]. Возникшая дуга может быть устойчивой, если катод, уже нагретый за счет проходящего через него тока и благодаря возникшему газовому разряду, продолжает эмитировать электроны в пространство между электродами. Электроды при нагреве до высоких температур (температура ВЭД достигает температур от 5000 К до 50000 К)

могут расплавиться. В связи с этим в проекте использовали графитовые электроды, температура плавления которых составляет  $4800^{\circ}\text{C}$ .

Исследование высоковольтной электрической (ВЭД) является частью проектной работы со студентами кафедры физики [1, 2]. Участники исследования собрали установку для получения высоковольтной электрической дуги, провели опыты с соблюдением правил техники безопасности, и сделали выводы. Используемые в исследовании различные газовые среды были получены путем реализации необходимых химических реакций [5, 6].

**Целью работы** является исследование поведения высоковольтной электрической дуги (ВЭД) в различных газовых средах, при разном давлении в сосуде, в магнитном поле и в пламени свечи. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи: сконструировать аппарат для получения ВЭД, обеспечить получение различных газовых смесей, выполнить изменение давления в сосуде, подготовить магниты для обеспечения магнитного поля. При выполнении исследования необходимо выполнять правила техники безопасности при работе с высоким напряжением.

### **Материалы и методы эксперимента**

Использованное в исследовании оборудование и химические реактивы приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

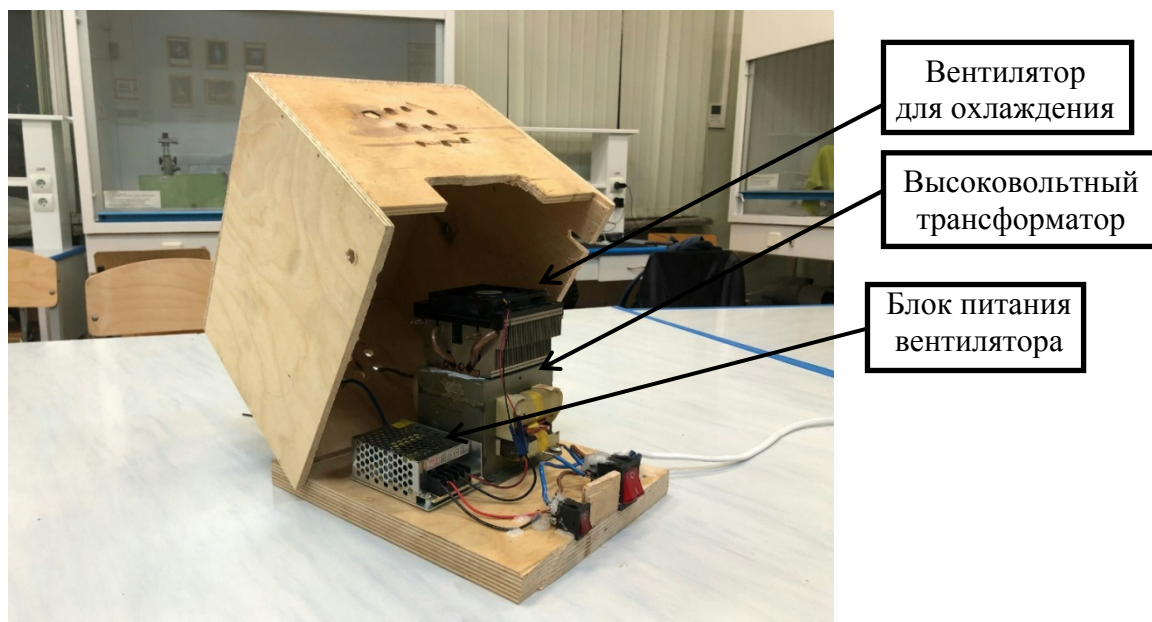
Перечень оборудования и химических реактивов

<b>Оборудование</b>	<b>Химические реактивы</b>
1. Электроды (карандашные грифеля).	1. Перманганат калия ( $\text{KMnO}_4$ ).
2. Высоковольтный трансформатор.	2. Пероксид водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).
3. Сосуд для получения газов.	3. Гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ ).
4. Сосуд для зажигания ВЭД в атмосфере одного из газов.	4. Хлорид аммония ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ).
5. Весы лабораторные.	5. Углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ).
6. Пирометр или термометр.	6. Уксусная кислота ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ).
7. Манометр.	7. Гелий ( $\text{He}$ ).
8. Насос вакуумный.	8. Пищевая сода ( $\text{NaHCO}_3$ ).
9. Толстый медный провод.	
10. Постоянные магниты с силой сцепления 160 Н.	
11. Свеча.	

### **Описание конструкции прибора**

Прибор для получения высоковольтной электрической дуги (рис. 1) представляет собой трансформатор, подключенный к сети 220 В и вентилятор, необходимый для охлаждения трансформатора, так как при длительном использовании он значительно нагревается.

К высоковольтному трансформатору подключаются графитовые электроды, находящиеся в газовой камере (стеклянной колбе). Эти электроды соединяются одножильным проводом, который при запуске прибора перегорает, зажигая основную высоковольтную электрическую дугу и выводя ее на «рабочий» режим.



*Рис. 1. Практическая реализация установки для получения высоковольтной электрической дуги*

### **Подготовка сосуда для проведения эксперимента**

А. Прежде, чем зажигать ВЭД, необходимо откачать воздух из сосуда, в котором зажигают дугу, создав в нем технический вакуум.

Б. Затем следует присоединить к данному сосуду, в котором зажигают ВЭД, сосуд, в котором в результате проведения химической реакции образуется искомая газовая смесь. Подсоединение следует выполнять только после окончания химической реакции.

В. Наконец, перекрыв доступ из одного сосуда в другой, зажечь ВЭД.

### **Проведение и результаты эксперимента**

#### ***1. Исследование ВЭД в кислороде***

А. Для получения кислорода в результате химической реакции необходимо смешать следующие реактивы: перманганат калия и пероксид водорода.



Б. Для изменения концентрации кислорода в сосуде, где зажигается ВЭД, следует изменить количество перманганата калия.

Наблюдения и измерения параметров ВЭД занесены в табл. 2.

*Таблица 2*

Изменение параметров ВЭД в зависимости от концентрации кислорода в сосуде

Концентрация кислорода, $\times 10^{22}$ см <sup>3</sup>	1,1	2,2	3,2	4,3	5,4
Время зажигания ВЭД, с	3,02	3,23	3,42	4,08	4,12
Время стабильного горения ВЭД, с	11,23	10,72	10,83	9,78	8,71
Температура сосуда после окончания горения ВЭД, °С	145	156	147	159	175
Цвет ВЭД	Бледно-оранжевый	Оранжевый	Ярко-оранжевый	Розово-оранжевый	Красный

#### ***Результаты эксперимента***

С увеличением концентрации кислорода в сосуде:

- 1) повышается температура ВЭД;
- 2) снижается стабильность ВЭД;
- 3) увеличивается расстояние от оси, на которой лежат электроды до оси возникшей дуги;
- 4) значительно увеличивается яркость ВЭД.

## **2. Исследование ВЭД в аммиаке**

А. Для получения аммиака в результате химической реакции необходимо смешать следующие реактивы: хлорид аммония и гидроксид водорода.



Б. Для изменения концентрации аммиака в сосуде, где зажигается ВЭД, следует изменить количество хлорида аммония.

Наблюдения и измерения параметров ВЭД занесены в табл. 3.

*Таблица 3*

Изменение параметров ВЭД в зависимости от количества аммиака в сосуде

Концентрация $\text{NH}_3 \times 10^{23} \text{ см}^{-3}$	0,57	1,14	1,70	2,27	2,83
Время зажигания ВЭД, с	2,91	3,04	3,15	3,45	3,72
Время стабильного горения ВЭД, с	13,28	13,02	12,84	12,73	12,68
Температура сосуда после окончания горения ВЭД, °С	108	104	91	93	85
Цвет ВЭД	Белый	Желтый	Бледно-оранжевый	Оранжевый	Красный

## **Результаты эксперимента**

С увеличением концентрации аммиака в сосуде: снижается температура ВЭД и ее стабильность; увеличивается расстояние от оси, на которой лежат электроды, до оси ВЭД; значительно увеличивается яркость ВЭД.

## **3. Исследование ВЭД в углекислом газе**

А. Для получения углекислого газа в результате химической реакции необходимо смешать следующие реактивы: уксусную кислоту и пищевую соду.



Б. Для изменения концентрации углекислого газа в сосуде, где зажигается ВЭД, следует изменить количество пищевой соды.

Наблюдения и измерения параметров ВЭД занесены в табл. 4.

*Таблица 4*

Изменение параметров ВЭД в зависимости от концентрации углекислого газа в сосуде

Концентрация углекислого газа в сосуде, $\times 10^{22}$ см <sup>3</sup>	5,2	6,7	8,1	9,4	10,7
Время зажигания ВЭД, с	4,01	3,98	4,57	4,85	4,82
Время стабильного горения ВЭД, с	13,41	13,24	12,92	12,84	12,5
Температура сосуда после окончания горения ВЭД, °С	102	99	100	95	83
Цвет ВЭД	Тусклый оранжевый	Бледно красный	Желтый	Розовый	Малиновый

### ***Результаты эксперимента***

Увеличение концентрации углекислого газа в камере ведет к ухудшению параметров зажигания и горения ВЭД: значительно увеличивается время зажигания ВЭД, вплоть до момента, когда зажигание ВЭД становится проблематичным; уменьшается время стабильного горения ВЭД, возникает постоянное касание дугой стенок сосуда и становится обыденностью; цвет ВЭД становится все более насыщенным и ярким.

### ***4. Исследование ВЭД в гелии***

А. Подсоединить к сосуду для зажигания ВЭД трубкой сосуд, в котором находится гелий и зажечь дугу.

Б. Проследить изменения параметров ВЭД в зависимости от изменения концентрации гелия в сосуде.

Измерения параметров представлены в табл. 5.

*Таблица 5*

Изменение параметров ВЭД в зависимости от концентрации гелия в сосуде

Объем He, дм <sup>3</sup>	Время зажигания ВЭД, с	Время стабильного горения ВЭД, с	Температура сосуда после окончания горения ВЭД, °С	Цвет ВЭД
0,1	4,45	15,02	190	Тусклый оранжевый
0,2	4,78	14,74	197	Бледно красный
0,3	4,77	14,46	203	Жёлтый
0,4	4,91	12,21	205	Розовый
0,5	5,01	10,5	194	Малиновый

### ***Результаты эксперимента***

Увеличение концентрации гелия ведет к ухудшению параметров ВЭД: увеличивается время зажигания и уменьшается время стабильного горения дуги. Температура сосуда по окончании горения почти не зависит от концентрации гелия, ее значение выше, чем для всех исследованных газовых смесей.

### ***5. Исследование ВЭД при изменении давления в сосуде***

Изменение давления в сосуде влияет на изменение параметров ВЭД. Результаты экспериментов приведены в табл. 6.

*Таблица 6*

Изменение параметров ВЭД при изменении давления в сосуде

Давление в сосуде, атм.	Время зажигания ВЭД, с	Время стабильного горения ВЭД, с	Высота подъема ВЭД, м	Температура сосуда после окончания горения, °С
0,6	1,30	Неограниченно	< 0,005	63
0,7	1,58	> 20	0,018	150
0,8	1,80	18,50	0,0274	171
0,9	1,98	16,91	0,03	180
1	2,01	15,87	0,04	173
1,1	3,07	13,52	0,05	201
1,2	3,12	12,69	0,0617	215
1,3	3,44	10,88	0,0865	253
1,4	3,58	9,14	Предельна для сосуда	Предел прочности сосуда

### ***Результаты эксперимента***

Увеличение давления в сосуде вызывает все большую нестабильность ВЭД.

Снижение давления в сосуде ведет к увеличению времени стабильного горения дуги.



### ***6. Исследование ВЭД в присутствии магнитов***

Исследование начинается при подведении магнитов к сосуду, в котором зажигается дуга. Изменяя расстояние между магнитами и сосудом с ВЭД, определяется влияние магнитов на параметры ВЭД.

Результаты исследования занесены в табл. 7.

*Таблица 7*

Изменение расположения ВЭД в сосуде в зависимости от расстояния  
до одного из полюсов магнита

Расстояние до магнита, м	0	0,01	0,02	0,03	0,04
Смещение ВЭД к одному из полюсов магнита, м	0,03	0,027	0,023	0,018	0,011

### ***Результат эксперимента***

Увеличения расстояния до магнита ведет к ухудшению стабилизации дуги. Присутствие магнитов заметно отклоняет ВЭД к одному из полюсов.

### ***7. Исследование ВЭД в пламени свечи***

Для исследования ВЭД в пламени свечи необходимо использовать медные электроды: два электрода Г-образной формы. Затем установить контакты в пламени свечи, но так чтобы они не касались друг друга. Изменение параметров ВЭД определяется при изменении расстояния от изгиба контактов до пламени свечи.

Результаты эксперимента представлены в табл. 8.

*Таблица 8*

Изменение параметров ВЭД в зависимости от расстояния до пламени свечи

Расстояние до пламени свечи, м.	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005
Количество плазменных вспышек, 1/с	2,88	2,63	2,41	2,01	1,22
Температура на свободных концах электродов после конца эксперимента, °С	384	270	320	289	250

### ***Результаты эксперимента***

Увеличение расстояния до свечи ведет к уменьшению количества плазменных вспышек за единицу времени, а следовательно, и к уменьшению температуры на конце электродов.

### **Обсуждение результатов**

Повышенная температура ВЭД в кислороде объясняется тем, что полученный кислород, как и атмосферный кислород, является катализатором горения и, как следствие, способствует увеличению выделяющегося тепла при горении [8]. Данное свойство можно использовать при сварке особо толстых листов прочных и особо прочных сталей. При значительном увеличении количества подаваемого кислорода в места сварки значительно увеличивается температура сварки, а, следовательно, и качество сварного шва.

Данную методику можно использовать при сварке соединений, подвергающихся особо высоким циклическим и статическим нагрузкам. Эта методика может найти применение в автомобилестроении.

Наше исследование показало, что для улучшения качества сварки и скорости плавления металлов в атмосфере, в которой проводится процесс, должна быть уменьшена концентрация углекислого газа [9].

Гелий в газообразном виде в естественных условиях в природе встречается редко, но эксперимент показал, что сварка в среде инертных газов позволяет достичь более высоких температур, и, тем самым, увеличить качество сварки и скорость плавления металлов. Кроме того, инертные газы не способны соединяться с атомами металлов [10].

Аммиак не оказывает влияния на дугу, которое можно было бы применить на практике.

Высоковольтная дуга ведет себя наиболее стабильно при максимально низком давлении, обеспечивающемся собранной схемой. В связи с этим дуга, горящая в техническом вакууме, может найти применение при высокоточной сварке и сварке высокопрочных и легированных сталей. В частности, при изготовлении высокопрочных соединений на корпусах машин, эксплуатация которых производится в экстремальных условиях.

Кроме того, при создании пониженного давления в сосуде, данная схема может быть использована в сверхмощных прожекторах,

в связи с непревзойденной яркости данной «дуговой лампы».

Высоковольтная дуга ведет себя наиболее стабильно при максимально низком давлении, обеспечивающемся собранной схемой.

Описанная выше реакция дуги на магниты подтверждает ее электромагнитную природу.

Магниты могут быть использованы как стабилизаторы поведения высоковольтной дуги [11]. Такой способ стабилизации может быть применен в автомобилестроении для сварки корпусов. А также для сварки высокопрочных сталей. В частности, намагничивание свариваемой поверхности позволит более эффективно использовать потенциал дуги и стабилизировать ее работу.

Свеча позволяет проводить большое количество плазменных вспышек в единицу времени. Данный эффект может быть полезен при точечной сварке.

### **Выводы**

1. Собрана установка для получения высоковольтной электрической дуги.
2. Показано, что время зажигания дуги и ее стабильное горение зависят от атмосферы, в которой она возникает: наименьшее время зажигания и наибольшая стабильность соответствуют пониженному атмосферному давлению.
3. Электромагнитная природа высоковольтной электрической дуги подтверждается поведением дуги в магнитном поле.
4. Приведены варианты использования ВЭД в автомобилестроении и для других видов сварочных работ.

### **Список литературы**

1. Ткачева, Т.М. Индивидуализация учебного процесса в техническом университете / Т.М. Ткачева, Г.Ю. Тимофеева // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2018. – № 2 (16). – С. 11.

2. Белкова, Ю.А. Использование новых форм самостоятельной работы студентов на кафедре физики МАДИ / Ю.А. Белкова, Е.Ю. Бахтина // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура.* – 2016. – № 1(7). – С. 10.
3. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – 2-е изд. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
4. Электрическая дуга: свойства. Защита от воздействия электрической дуги. – URL: [https://www.syl.ru/article/201638/new\\_elektricheskaya-duga-svoystva-zaschita-ot-vozdeystviya-elektricheskoy-dugi](https://www.syl.ru/article/201638/new_elektricheskaya-duga-svoystva-zaschita-ot-vozdeystviya-elektricheskoy-dugi) (дата обращения: 04.09.2018).
5. Глинка, Н.Л. Общая химия: учеб. пособие / Н.Л. Глинка. – 30-е изд. – М., 2003. – 728 с.
6. Калькулятор химических реакций. – URL: <https://www.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php?equation> (дата обращения: 14.09.2018).
7. Электрическая дуга: свойства. Защита от воздействия электрической дуги. – URL: [https://www.syl.ru/article/201638/new\\_elektricheskaya-duga-svoystva-zaschita-ot-vozdeystviya-elektricheskoy-dugi](https://www.syl.ru/article/201638/new_elektricheskaya-duga-svoystva-zaschita-ot-vozdeystviya-elektricheskoy-dugi) (дата обращения: 14.09.2018).
8. Марковский, Л.Я. Химическая электротермия / Л.Я. Марковский, Д.Л. Оршанский, В.П. Прянишников. – Ленинград-Москва: Госхимиздат, 1952. – 408 с.
9. Сущность процесс газовой сварки в углекислом газе. – URL: [https://studwood.ru/1002776/tovarovedenie/suschnost\\_protssesa\\_dugovoy\\_svar-ki\\_uglekislom\\_gaze](https://studwood.ru/1002776/tovarovedenie/suschnost_protssesa_dugovoy_svar-ki_uglekislom_gaze) (дата обращения: 15.09.2018).
10. Особенности электрического разряда в инертных газах. – URL: [http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/argonno-dygovaya/elektro-dyga/osobennosti\\_elektricheskogo\\_razrada\\_v\\_inertnix\\_gaza](http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/argonno-dygovaya/elektro-dyga/osobennosti_elektricheskogo_razrada_v_inertnix_gaza) (дата обращения: 14.09.2018).
11. Влияние магнитных полей на сварочную дугу. – URL: <https://poznayka.org/s78208t1.html> (дата обращения: 15.09.2018).

### References

1. Tkacheva T.M., Timofeeva G.Yu. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2018, no. 2 (16), p. 11.
2. Belkova Yu.A., Bakhtina E.Yu. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2016, no. 1 (7), p. 10.
3. Raizer Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* (Gas Discharge Physics), Moscow, Nauka, 1992, 536 p.
4. URL: [https://www.syl.ru/article/201638/new\\_elektricheskaya-duga-svoystva-zaschita-ot-vozdeystviya-elektricheskoy-dugi](https://www.syl.ru/article/201638/new_elektricheskaya-duga-svoystva-zaschita-ot-vozdeystviya-elektricheskoy-dugi)
5. Glinka N.L. *Obshchaya himiya* (General chemistry), Moscow, 2003, 728 p.
6. URL: <https://www.chemicalaid.com/tools/equationbalancer.php?equation>
7. URL: [https://www.syl.ru/article/201638/new\\_elektricheskaya-duga-svoystva-zaschita-ot-vozdeystviya-elektricheskoy-dugi](https://www.syl.ru/article/201638/new_elektricheskaya-duga-svoystva-zaschita-ot-vozdeystviya-elektricheskoy-dugi)
8. Markovskii L.Ya., Orshanskii D.L., Pryanishnikov V.P. *Himicheskaya elektrotermiya* (Chemical electrothermia), Leningrad-Moscow, Goshimizdat, 1952, 408 p.
9. URL: [https://studwood.ru/1002776/tovarovedenie/suschnost\\_protssesa\\_dugovoy\\_svar-ki\\_uglekislom\\_gaze](https://studwood.ru/1002776/tovarovedenie/suschnost_protssesa_dugovoy_svar-ki_uglekislom_gaze)
10. URL: [http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/argonno-dygovaya/elektrodyga/osobennosti\\_elektricheskogo\\_razrada\\_v\\_inertnix\\_gaza](http://metallicheckiy-portal.ru/articles/svarka/argonno-dygovaya/elektrodyga/osobennosti_elektricheskogo_razrada_v_inertnix_gaza)
11. URL: <https://poznayka.org/s78208t1.html>