

Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

621.376.3:621.385.65:628.314 (043)

Қолжазба құқығында

МАМАДИЯРОВ МАКСАТ МУРАТОВИЧ

**Тәжі разрядқа негізделген жоғарғы жиілікті озонатор қондырғысын
зерттеу және модельдеу**

6D071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар

Философия докторы (PhD)
дәрежесін алуға арналған диссертация

Ғылыми кеңесшілер:
Абдыкадыров А.А.,
т.ғ.к., ассоц. проф.
Қ. И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТЗУ,
Қазақстан Республикасы.
Коровкин Н.В.,
т.ғ.д., проф.
Ұлы Петр атындағы Санкт-
Петербург политехникалық
университеті
Ресей Федерациясы

Қазақстан Республикасы
Алматы, 2023

МАЗМҰНЫ

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР		3
АНЫҚТАМАЛАР		4
БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР		5
КІРІСПЕ		6
1	ДИССЕРТАЦИЯЛЫҚ ЖҰМЫСТЫҢ ТАҚЫРЫБЫ БОЙЫНША ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ	11
1.1	Электрлік разрядқа негізделген озонаторларды қолдану аймақтары	11
1.2	Электр разряды теориясының негізгі ережелері	18
1.3	Озонатор камерасындағы тосқауыл разряды әсерінен пайда болған температураның озон синтезіне әсері	24
2	ТӘЖІ РАЗРЯДҚА НЕГІЗДЕЛГЕН ОЗОНАТОР ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ	31
2.1	Микроразряд арқылы тасымалданатын электр энергиясының мөлшері	31
2.2	Активті кедергінің электр қуатын зарядтау үрдісіне әсері	36
3	ЖОҒАРЫ ЖИЛІКТІ ТӘЖДІ РАЗРЯДТЫ ОЗОНАТОР ЖҮЙЕСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛДЕУ	41
3.1	Мәселенің алға қойылған тапсырмасы	41
3.2	Жазық - симметриялық координаталар жүйесіндегі таратылған параметрлердің математикалық моделі	47
3.3	Таратылған параметрлері бар цилиндрлік координаталардың математикалық модель	61
3.4	Таратылған параметрлері бар жүйенің математикалық моделі	65
4	ТӘЖІ РАЗРЯДЫ КӨМЕГІМЕН ОЗОНДЫ ӨНДЕУ ЖҮЙЕСІН ТӘЖІРИБЕЛІК ЗЕРТТЕУ	69
4.1	Озонды өңдеу үшін жасалған құрылғының макеті арқылы физикалық модельдеу үрдісін зерттеу	69
4.2	Озон генерациялау жүйелеріндегі тосқауыл разрядын осциллографиялық зерттеу	72
4.3	Озон өңдеу жүйелерін эксперименттік зерттеу және салыстыру	80
4.3.1	Тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерін секцияланған электродпен эксперименттік зерттеу және салыстыру	83
4.3.2	Ауа ылғалдылығының ауытқуының эксперимент нәтижелеріне әсерін анықтау	91
4.4	Тәжі разрядқа негізделген озонатордың су тазалау үрдісіндегі экологиялық тиімділігін зерттеу	97
ҚОРЫТЫНДЫ		110
ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ		116

НОРМАТИВТІК СІЛТЕМЕЛЕР

Осы диссертацияда келесі стандарттарға сілтемелер қолданылған:

ҚР СТ 2.4-2007 - бірлікті қамтамасыз етудің мемлекеттік жүйесі. Қазақстан Республикасының өлшемдері (ҚР МЖӘ). Өлшеу құралдарын тексеру. Ұйымдастыру және өткізу тәртібі.

«Диссертацияларды және авторефераттарды рәсімдеу бойынша нұсқаулық», ҚР БҒМ, Жоғары аттестаттау комитеті. – Алматы, 2014.

МЕСТ Р 57139-2016 Оптикалық кабельдер. Терминдар және анықтамалар.

ҚР СТ 1.1-94 ҚР МӨЖ - терминдер мен анықтамалар.

ҚР МЖМБС 5.04.034 – 2011 «Қазақстан Республикасының Мемлекеттік жалпыға міндетті білім беру стандарты. Жоғары оқу орынан кейінгі білім. Докторантура». Негізгі ережелер /ҚР білім және ғылым министрімен бекітілген.

АНЫҚТАМАЛАР

Осы диссертацияда тиісті анықтамалары бар мынандай негізгі терминдер қолданылған:

Жоғары жиілік техникасы – 300 МГц-тен 300 ГГц-ке дейінгі жиілік диапазонындағы электрмагниттік тербелістер мен толқындардың қасиетін зерттеумен және оларды тиімді қолданумен айналысатын ғылым мен техника саласы.

Жиілік электрмагниттік зондылау (ЖЭЗ) - өзгермелі электрмагниттік өрістің электрлік және магниттік бөліктері мен олардың жиілігінің арасындағы байланысты зерттеуге негізделген электрбарлау әдістерінің бірі.

Тәжі разряды - нүктелер, жіңішке сымдар бар электродтардың жанындағы біртекті емес өрістерде пайда болатын тәуелсіз газ разряды.

Тосқауыл разряды - электродтардың кем дегенде біреуінің диэлектрлік жабыны бар электродтар арасындағы пайда болатын газ разряды.

Электр доғасы (вольталық доға, доғалық разряд) газдағы электр разрядының бір түрі болып табылады.

Тәжі электроды - электростатикалық активті элементтерінің бірі болып табылады және өнеркәсіптік газдарды электростатикалық шаңсыздандыру үшін біркелкі емес электр өрісін құрайтын тәж разрядын құруға қызмет етеді.

Кернеу ұлғайтқышы – төменгі айнымалы (пульсациялық) кернеуді жоғары вольтты тікелей кернеуге түрлендіруге арналған құрылғы.

Озонатор - озон (O₃) өндіруге арналған құрылғы.

Ионизатор - бұл газды немесе сұйықтықты иондауға арналған құрылғы.

Вольт-амперлік сипаттама (ВАС) – кернеу мен ток арасындағы байланыс.

Анод - сыртқы тізбектегі электрондардың қозғалысы сыртқа бағытталуымен сипатталатын электрондық немесе электротехникалық аспаптың (мысалы, электровакуумдық аспап электрондық шамның, гальваникалық элементтің) электроды.

Катод - вакуумда немесе газда электрод аралық кеңістіктің өткізгіштігін қамтамасыз ететін электровакуумдық немесе газ разрядтаушы аспаптардың теріс электроды;

БЕЛГІЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

f- жиілік;

S - микроразрядтың кедергі аймағы, м²;

$\tau_{\text{разр.}}$ - микроразряд уақытының тұрақтысы, с;

α – жылу диффузиялық коэффициенті, м²/с;

t – микроразряд уақыты, с.

$C_{\text{об}}$ - диэлектрлік кедергілердің жалпы сыйымдылығы және сериялық қосылымдағы разряд саңылауы;

$C_{\text{б}}$ - озон камерасындағы диэлектрлік кедергілердің разрядының сыйымдылығы;

$C_{\text{п}}$ - разряд саңылауының электр сыйымдылығы.

мұндағы S - озонатор камерасының разряд аймағы,

$\epsilon_{\text{б}}$ – кедергілердің есептік салыстырмалы өткізгіштігі,

$d_{\text{б}}$ - диэлектрлік кедергілердің есептік қалыңдығы,

$d_{\text{п}}$ – разряд аралығының биіктігі.

ЭТРН- электрлі тәжі разрядқа негізделген;

ТЖО - тәжі разрядтағы озонатор;

ЖЖОИ - жоғарғы жиілікті озонатор импульсі;

ЖЖ - жоғарғы жиілікті;

ГКБ- генератордың кернеудегі басқаруы;

ДМ – демодулятор;

ГБ – генераторды басқару;

МДМ – модулятор демодулятор;

МАЭК - микрозаряд аймағындағы электрондардың концентрациясы;

ТД- тосқауыл разряды;

ЭР- электрлі разряд;

КҰ- кернеу ұлғайтқыш;

ВАС- вольт-амперлік сипаттамасы;

ЭД- электр доғасы;

ТЭ- тәжі электроды;

ТР- тосқауыл разряды;

ЖЭЗ- жиілік электромагнитін зондылау;

Диссертацияда электротехникалық әдебиеттер үшін дәстүрлі бірліктер қолданылады: г, см, с. Жиілік энергия өлшемі эВ, электр шамаларын өлшеу үшін В, А, кОм, Вт, Гц, температура – К, °С.

КІРІСПЕ

Тақырыптың өзектілігі. Электрод айналасында пайда болатын тәжіге ұқсайтын разряд электр разрядының бірі болып табылады. Құрамында оттегі бар озон газын синтездеудің үнемді үрдістерінің бірі - ауа немесе таза оттегі. Қазіргі заманға сәйкес тәжі разряд туралы түсініктерде ол кеңістіктік - уақыттық құрылымы жеке микроразрядтардан тұрады. Микроразряд параметрлерін реттеу электр қуатын жақсартып алады.

Тәжі разряды озонды өңдеу жүйелерінде қолданылады. Озон арқылы өнеркәсіпте ластанған су мен ауаны, тазалау кезінде залалсыздандырудың экологиялық таза әдістері болып табылады.

Тәжі разряд арқылы озонды өңдеу жүйелері жоғары вольтты электрмен жабдықтау жүйесінің сұлбалық комбинациясы, озонатордың разрядты камераларын және пневматикалық ауамен жабдықтау жүйесі немесе оттегі, озонатор жабдығының негізгі құрамдас бөлігі болып табылады. Сонымен қатар озонатор жабдығы үрдісті басқару жүйесін қамтиды ол озонның электросинтезі, қорғау, бақылау және салқындату жүйесінен тұрады.

Заманауи озонаторлар, электрмен жабдықтау жүйесіне негізделген. Ол синусоидалы немесе импульстік жоғары кернеу көзімен қоректенеді. Генератордың жиілігі әдетте 1 кГц немесе оданда жоғары. Озонатордың камераларын салқындату жүйесі ауа немесе су арқылы жүргізіледі. Жүйені басқару және қорғау үшін сақтандырғыштар, автоматты ажыратқыштар және тағы басқа құрылғылар қолданылады. Электрсинтез үрдісінің параметрлерін бақылау үшін электр өлшеу құралдары, шығын өлшегіштер және оттегі концентрациясы қажет.

Диссертацияда жиілікті реттеу арқылы озон концентрациясын арттырудың негізгі мәселесі қарастырылған. Тәжі разряды айналасында жылуды реттеу арқылы озонды өңдеу тиімділігін арттыруға болады. Бұл мәселенің сәтті шешімі келесі нәтижелерге қол жеткізеді:

- озон синтезі үрдісінің энергия тиімділігін арттыру;
- диэлектрлік кедергінің электротермиялық бұзылу ықтималдығын азайту;
- разряд камералары үшін салқындату жүйесінің орналасуын жеңілдету.

Тақырыптың даму дәрежесі. Жоғарғы жиілікті тәжі разряд жүйесін зерттеу қазіргі заманғы отандық және шетелдік авторлардың жұмыстарының негізгі тақырыбы болып табылады. Мысалы А.А.Абдықадыров, Н.Қ.Қожаспаев, Ш.А.Бахтаев, А.А.Боканова К.В. Козлов, В.И. Гибалов, В.Г. Самойлович, М.В. Соколова, Г.Дж. Пиец, У.Когельшац, М.Р. Газанчай және т.б. ғалымдардың жүйелі зерттеулерінде тосқауыл және бөгеттік разрядта озонды өңдеу тиімділігін арттыру негізгі мәселе болып табылады. Айта кету керек, С.В. Шапиро және тағы басқа авторлар тобы озонатордағы газды салқындату үшін Джоуль - Томсон эффектісін қолданады. Дегенмен ғылыми әдебиеттерде бұл әдісі озонатордағы разряд аймағындағы жылу түзілуін азайтуға нақты нәтиже бермейді.

Диссертацияның мақсаты. Жоғарғы жиілікте жұмыс жасайтын тәжі разрядқа негізделген озонатордың энергетикалық және экономикалық тиімділігін арттыру болып табылады.

Осы мақсатқа жету үшін диссертацияда келесі міндеттер шешілді:

1. Жоғарғы жиілікті тәжі разрядқа негізделген озонатордың генератор жүйесіндегі үрдістің математикалық модельін құру және зерттеу;
2. Тәжі разрядқа негізделген озонатордың генератор жүйесінің энерготиімділігін тәжірибе жүзінде зерттеу;
3. Қондырғы жүйесінің максималды тиімділігін анықтау үшін жоғарғы электродтың параметрлерін анықтау.

Диссертацияның ғылыми жаңалығы мынадай:

1. Жоғарғы жиілікті тәжі разрядқа негізделген ЭТРО - 03 озонатор қондырғысының энергетикалық және экономикалық тиімділігін арттыру мақсатында жаңа құрылғының конструкциялық шешімі Қазақстан Республикасының авторлық куәлігімен яғни ҚР патентімен қорғалған.
2. Тәжіленуші электродтың айналасында пайда болатын микроазрядының импульсінің параметрлері анықталды, мысалы: микроазрядтың максималды ұзындығы, әзірлеу уақыты, максималды ток және теориялық есептелген мәндер диссертацияда алынған эксперименттік мәліметтермен жақсы сәйкес келеді
3. Тізбектегі активті кедергінің жоғарылауы микроазряд импульсінің ұзындығын арттырады, ал микроазрядтың ұзындығы электр тізбегінің активті кедергісіне тәуелді емес екені анықталды.
4. Тәжі разрядқа негізделген жоғарғы кернеулі электродқа жақын және Джоуль энергиясының шығындарының мәндері есептеліп, озонатордың жұмыс режимдері анықталды.

Жұмыстың теориялық және практикалық маңыздылығы.

Тәжіленуші электрод айналасында тәжі разрядтық ток эволюциясының математикалық заңдылықтары орнатылды. Сонымен қатар тәжіленуші электродтарды жасау технологиясының элементтері әзірленді және ол озонатор қондырғыларының жаңа конструкциясын жасауға мүмкіндік береді. Ұсынылған конструкция белгілі бір уақытта өнімділікті 20% пайызға дейін арттырады.

Әдістеме және зерттеу әдістері. Зерттеу жұмысы барысында салыстырмалы осциллограммаларды, сондай - ақ электр қуатын тәжірибелік зерттеулер, физикалық параметрлері, өнімділігі және температурасының модельдері әзірленді. Электр тізбектеріндегі жинақталған және үлестірілген параметрлер бойынша теорияны қолдану арқылы математикалық модельдеу жүргізілді.

Құрылғының конструкциялық шешімі бойынша озонаторды салқындату жүйесі мен тәжіленуші электродқа жоғарғы жиілікті кернеу беру мәселесі зерттелді.

Қорғауға жіберу яғни шығару ережелері.

1. Озонатор жүйесінің тиімділігін арттырудың жаңа әдісі микроразряд айналасында яғни камерада қалыптасқан температураны төмендету, сол сияқты тәжіленуші электродтың кедергісін азайту қажеттігі анықталды.

2. Тәжіленуші электрод айналасында разряд әсерінен туындаған озон түзу жүйелерінің математикалық модельдері құрылды.

3. Жоғарғы жиілікті кернеу әсерінен туындаған тәжі разряд арқылы озонды өңдеу жүйелерінің жұмыс үлгілері, осциллографиялық зерттеуді жүргізуге мүмкіндік беретін электр қуатының параметрлерін анықтау, өлшеу, салыстыру және электродтардың әртүрлі активті кедергілеріндегі өнімділігі анықталды.

4. Ұсынылып отырылған ЭТРО - 03 тәжі разрядқа негізделген озонатордың теориялық және эксперименттік зерттеу нәтижелері бойынша озонды өңдеу жүйелерінің өнімділігі мен энергия тиімділігін арттыру анықталды.

Нәтижелердің сенімділік дәрежесі. Зерттеу жұмысынан алынған мәліметтердің нәтижелері теория мен эксперимент арасындағы шартты салыстыру арқылы расталады. Математикалық модельдердің дәлдігі қабылданған ұқсастықтармен және болжамдармен шектелген. Сол сияқты зерттеу жұмысынан алынған нәтижелердің дәлдігі тәжірибе жұмыстарын өлшеу құралдарының дәлдігімен шектеледі. Сонымен қатар ғылыми зерттеу жұмысы бойынша электрмен жабдықтау жүйесі мен ауа беру жүйесінің параметрлерінің ауытқуы анықталды.

Жұмысты апробациялау. Диссертацияның негізгі нәтижелері төмендегі ғылыми бағытта баяндалып, талқыланды:

1. Abdykadyrov A., Korovkin N., Mamadiyarov M.M., Tashtai Y., Domrachev V. Practical research of efficiency of the installation ETRO-02 ozonizer based on the corona discharge. REEPE 2020 Conf. Ven Ue: Moscow Power Engineering Instit Ute (MPEI) 2020 International Yo Uth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) Date of Conference: 12-14 March 2020 ISBN:978-1-7281-5656-9.

2. Abdykadyrov A., Korovkin N., Mamadiyarov M.M., Tashtay Y., Syrgabayev I., Marx Uly S. Research of the process of disinfection and p Urification of drinking water Using ETRO-02 plant based on high-freq Uensy corona discharge. 2021 3rd International Yo Uth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Date of Conference: 11-13 March 2021 ISBN:978-1-7281-8399-2.

3. Abdykadyrov A., Mamadiyarov M.M., Marx Uly S., Smailov N., Zh Un Usov K., K Uttybaeva A., Amanzholov A., Orazbekov A. Investigation of the Efficiency of the Ozonator in the Process of Water P Urification Based on the Corona Discharge. Jo Urlan of Ecological Engineering 2023; 24(2):140–151 ISSN 2299-8993, CiteScore Q2.

4. Абдыкадыров А.А., Мамадияров М.М., Марксұлы С., Ақылжан П. Жоғарғы жиілікті тәжі разрядқа негізделген озонатор қондырғысы арқылы ауыз суды залалсыздандыру тиімділігін зерттеу. Научные труды ВИИРЭиС, 2022, №4 (49).

5. Абдыкадыров А.А., Мамадияров М.М., Марксұлы С., Куттыбаева А.Е., Алиев А. Суды залалсыздандыруға негізделген ЭТРО-03 озонатор қондырғысын күн сәулесі арқылы қоректендіру мәселесін зерттеу. 2022 Научные труды ВИИРЭиС, №3 (49).

6. Абдыкадыров А.А., Мамадияров М.М., Досбаев Ж.М. Жоғарғы кернеуге негізделген тәжіленуші электродты зерттеу. Актуальные научные исследования в современном мире Выпуск 4(24) Апрель 2017.

7. Абдыкадыров А.А., Мамадияров М.М., Сафарова А.М. Озонатор қондырғысындағы тәжіленуші электродтарды тәжірибе жүргізу арқылы зерттеп талдау. Сатпаевских чтений инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК, Алматы 2019. С 14-18, ISBN:978-601-323-145.

8. Абдыкадыров А.А., Мамадияров М.М., Сафарова А.М. Озонның судағы ерігіштігі мен өзіндік таралуы. Сатпаевских чтений инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК, Алматы 2019. С 18-22, ISBN:978-601-323-145.

9. Абдыкадыров А.А., Мамадияров М.М., Әліби Н.М., Қозыбай Б.Қ. Қапшағай су қоймасындағы сарқынды суды озон технологиясының көмегімен тазалау. озонның судағы ерігіштігі мен өзіндік таралуы. Сатпаевских чтений инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК, Алматы 2019. С 6-10, ISBN:978-601-323-145

10. Абдыкадыров А.А., Мамадияров М.М., Кудайбергенова Б.К., Ещанов Б.С. Вячеслав сарқындысу қоймасындағы биологиялық зиянды заттарды озон технологиясымен залалсыздандырудың ерекшеліктері. Сатпаевских чтений инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК, Алматы 2019. С 11-14, ISBN:978-601-323-145

Жарияланымдар. Диссертацияның негізгі ережелері мен нәтижелерін зерттеулер 11 жарияланымда, оның ішінде 3 мақала, Қазақстан Республикасының Жоғары аттестаттау комиссиясы басып шығаруға ұсынылған басылымдарда жарияланған. Өнертабысқа бір патентке тапсырыс берілді.

Автордың жеке үлесі. Жоғарғы жиілікті тәжі разрядқа негізделген қуаты 2кВт, жиілігі 13кГц, кернеуі 8кВ ЭТРО-03 озонатор қондырғысының жаңа конструкциясын ойлап тапты. Сонымен қатар зерттеу жұмысы бойынша анықталған параметрлер бойынша математикалық модель жасады. Тәжі разрядқа негізделген озонатордың электродтар айналасындағы температураны төмендету жүйесін теориялық талқылап, эксперимент жүзінде зерттеу жұмыстарын жүргізді.

Жұмыстың құрылымы мен көлемі. Диссертация кіріспеден, 4 негізгі тарау бөлімдерінен тұрады, Қорытындылар, 2 қосымша, 114 бетте толтырылған, 53 суреттер мен сұлбалар, 25 кесте, 104 атаудағы библиография тұрады.

1 ДИССЕРТАЦИЯЛЫҚ ЖҰМЫСТЫҢ ТАҚЫРЫБЫ БОЙЫНША ӘДЕБИЕТКЕ ШОЛУ

1.1 Электрлік разрядқа негізделген озонаторларды қолдану аймақтары

Озонды электр тәжі разрядында өңдеу тосқауыл разряды мен электрохимиялық әдіске қарағанда ең көп тараған. Ол экономикалық жағынан озон өндірудің басқа әдістерімен салыстырғанда тиімдірек. Қазіргі кезде көптеген тосқауыл разрядына негізделген озонаторлардың конструкциялары өте көп. Тосқауыл разрядына негізделген озонаторлардың конструкциялық ерекшелігі электродтар арасында тосқауыл материал ретінде шыны немесе арнайы эмаль қолданылады [1].

Озон өндірудің электрохимиялық әдісі өндірілген озон мөлшерін өте дәл бақылауға мүмкіндік береді. Өйткені бұл түрде түзілетін озон мөлшері мен озонатордың электрохимиялық ұяшығы арқылы өтетін ток арасында белгілі бір байланыс бар, ол Фарадей заңына негізделген [2].

Тосқауылдық разряд ауаны, газды немесе кез келген сұйықтықты залалсыздандырып, тазартуда тікелей қолданылады. Бұрын жалпы күкіртсутек, аммиак, ұшпа органикалық сияқты қосылыстардан газ шығарындыларын плазмалық өңдеу сол сияқты оксидті тотығу кезінде пайдаланылған. Сонымен қатар адгезияны жақсарту мақсатында материалдардың бетін өңдеуде, сонымен қатар жұқа жабындарды өңдеуді немесе тұндыруды жақсартады. Төмендегі 1.1 - кестеде кейбір озонатор жасайтын әлемдік үздіктердің негізгі сипаттамалары берілген. Онда отандық және шетелдік тосқауыл және тәжі разрядқа негізделген озонаторлар топтамасы келтірілген [3,4].

Озон және оны өндіру жүйесін пайдаланудың ерекшелігі мынада: озон – пайдалану орнында өндірілетін өнім бола тұра тасымалдау шығындары жоқ, әсіресе жоғары концентрацияда 20% пайыз озон жарылғыш жолмен оттегіге айналуы мүмкін [5]. Сондықтан қысыммен құбыр арқылы озонды беру немесе цилиндрлерге айдау қауіпті.

Озон тотықтырғыш және дезинфекциялау қабілеті өте жақсы болғандықтан өндірісте әртүрлі салада кеңінен қолданылады. Алғашқы тәжірибелер суды озонмен дезинфекциялау 19 ғасырдың аяғында Францияда жүргізілді. XX ғасырдың басында кейбір жерлерде суды озондау қондырғылары мысалы Германия мен Франция қалалары, сондай - ақ Петербургта (Ресей) салына бастады [6].

Суды тазартудан басқа озон келесі салаларда да қолданылады:

- целлюлозаны ағарту [7];
- ағынды суларды тазарту (фенол және оның туындыларынан, мұнай құрамдас бөлігінен, беттік белсенді заттар, бояғыштар, цианидтерден және т.б. [8]);
- газ шығарындыларын тазалау (жылу электр станцияларының шығарындылары, газдар өнеркәсіптер, сасық иісті газдар және т.б. [9]);

- кендерден металдарды алу үшін гидрометаллургияда озонды қолдану келешекті бағыт болып табылады [8];

- медицинада, ауыл шаруашылығында және кейбір басқа салаларда қолданылады.

Жоғарыда айтылған белгілі бір аймақ үшін озонды қолдану бағытында озонның алдымен мөлшерін білу керек. Атап айтқанда мысалы 1 литр суды тотықтырып, дезинфекциялау үшін қанша миллиграмм озон мөлшері қажет екенің білу керек [9]. Сондықтан көп сатылы суды залалсыздандыру үшін суды тазарту схемасында озонның жеткілікті дозасы 5 - 6 мг/л жеткілікті екені көптеген зерттеу жұмысында белгілі (су үшін, елеулі дезинфекцияны қажет етеді). Салыстырмалы түрде төмен түсі суға (50 градусқа дейін), озон концентрациясы 5 мг/л - ден аспауы керек, жоғары түсті суға (> 200°) шамамен озон концентрациясын 30 мг/л қажет. Сондықтан суларды жоғары бояумен тазарту реагент әдісін қолданған жөн [10].

Сонымен қатар, технологиялық үрдіс барысында суды озондау кезінде озонның қалдық концентрациясын ескеру қажет [11, б.10].

Ауадағы бактериялар мен микроорганизмдерді жою үшін озон шамамен 0,05 мг/л мөлшері қажет. Микрофлораны жою үшін контейнерлерді өңдеу кезінде шамамен 0,5 мг/л озон дозасы қажет. Екі жағдайда да озонмен өңдеу уақыты шамамен жарты сағатты құрайды [9].

Ағынды суларды әртүрлі күшті ластаушы заттардаң тазарту үшін озонның мөлшері шамамен 30 - 100 мг/л қажет болуы мүмкін [10,11 б.28].

Озонды кез келген технологиялық үрдісте қолдану кезінде, адам онымен жанасуы мүмкін болса, адамның организмі үшін озон концентрациясының ШРК деңгейінен жоғары ауаны жұтуына жол бермеу үшін сақтық шараларын қолдану қажет. Ауадағы озонның максималды рұқсат етілген концентрациясы 0,1 мг / м³ немесе 5·10⁻⁶% пайызды құрайды [5].

Анықтамаға сәйкес, ингаляциялық ауадағы озонның концентрациясы ШРК деңгейінен төмен (< 0,1 мг/м жұмыс тәжірибесі үрдісінде немесе ұзақ уақыт бойы заманауи зерттеу әдістерімен анықталған ауруларды немесе денсаулық жағдайындағы ауытқуларды тудыруы мүмкін емес) [12].

Адамның жұмыс үрдісінде озонның мөлшері ШРК асып кеткен кезде дереу денсаулық жағдайындағы ауытқулардың келесі белгілері анықталады [13, б.58]:

- 0,1 - 0,2 мг/м³ - тамақ пен мұрынның тітіркенуі, тыныс алу жолдарының шырышты қабығының құрғауы жолдары;

- 0,4 - 1 мг/м³ - кейбір көру параметрлерінің өзгеруі;

- 2 - 15 мг/м³ - тыныс алу жолдарының тітіркенуі, жөтел, тамақтың күйіп қалуы, бас айналу, бас ауруы, құсу, қатты шаршау, өткір жүрек қызметінің төмендеуі;

- 15 - 20 мг/м³ - өкпе ісінуі артады.

ШРК мөлшерінен жоғары концентрациялы озон болашақта жүйке жүйесін [8], жүрек - қан тамырларының бұзылуын тудырады [13, б.61]. Сол сияқты ерімейтін формалардың пайда болуымен адам қанындағы холестерин атеросклероз, ұрпақты болу мүшелеріне әсер етеді [14].

Кесте 1.1 – Кейбір тосқауыл және тәжі разрядқа негізделген шетелдік озонаторлардың сипаттамалары

Озонатордың атауы, өндіруші	Тұтынатың энергиясы	Озонды ауа немесе оттегі арқылы синтездеу	Қосымша параметрлері
Л7П / «Курганхиммаш»	14 кВт·сағат/кг өнімділігі 20 г/м ³	Ауа	0 - 160 г/сағат О ₃ , салмағы 240кг
ПЗ1 / «Курганхиммаш», Ресей	17 кВА·сағат/кг өнімділігі 20 г/м ³	Ауа*	760 г/сағат О ₃ , меншікті өнімділігі 1,3 г/сағат·дм ² , 400 - 800 Гц, салмағы 360 кг
«БИКОЗ-25» / ФГУП "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"	6 кВт·сағат/кг өнімділігі 150 г/м ³	Оттегі	25 г/сағат О ₃ , салмағы 1,3 кг
«БИКОЗ-1000» / ФГУП "ГНЦ РФ ТРИНИТИ"	5 кВт·сағат/кг өнімділігі 70 г/м ³	Оттегі	1000 г/сағат О ₃ , салмағы 10 кг
50К / НПО «ПозитронКвинта», Ресей	10 кВт·сағат/кг өнімділігі 100 г/м ³	Оттегі	50 г/сағат О ₃ , салмағы 60 кг
ОБП-3 / ЗАО «Мәскеу озонаторы», Ресей	8,33 кВт·сағат/кг өнімділігі 100 г/м ³	Оттегі*	3000 г/сағат О ₃ , салмағы 220 кг
LAB 2B / Ozonia - Degremont - S Uez Environnement - GDF-S Uez, Швеция	13 кВА·сағат/кг өнімділігі 50 г/м ³	Оттегі*	8 г/сағат О ₃ , салмағы 6 кг
OZAT CFS-7 / Ozonia, Швеция	9 кВА·сағат/кг өнімділігі 120 г/м ³	Оттегі*	500 г/сағат О ₃ , салмағы 200 кг
CFV-05 / Ozonia, Швеция	7,7 кВА·сағат/кг өнімділігі 120 г/м ³	Оттегі*	5000 г/сағат О ₃ , меншікті өнімділігі 2,4 г/сағат·дм ² , салмағы 2000 кг
CFY-24 / ICAN, ҚХР	13,3 кВт·сағат/кг өнімділігі 60 г/м ³	Оттегі	24 г/сағат О ₃ , салмағы 40 кг
CFY-200 / ICAN, ҚХР	12,5 кВт·сағат/кг өнімділігі 60 г/м ³	Оттегі	200 г/сағат О ₃ , салмағы 280 кг
GSO-60 / WEDECO - Хулем, Германия - АҚШ	7,5 кВт·сағат/кг өнімділігі 100 г/м ³	Оттегі	1000 г/сағат О ₃ , салмағы 360 кг
SMO-550 / WEDECO - Хулем, Германия - АҚШ	6,5 кВт·сағат/кг өнімділігі 102 г/м ³	Оттегі	8000 г/сағат О ₃ , салмағы 3250 кг
SMA-500 / WEDECO - Хулем, Германия - АҚШ	5,0 кВт·сағат/кг өнімділігі 30 г/м ³	Ауа	9700 г/сағат О ₃ , салмағы 2850 кг

Ескерту: кейбір озонаторлар (*) оттегінде және атмосфералық ауа арқылы да жұмыс жасайды. Бірақ сипаттамалары бойынша өзіндік ерекшеліктері бар.

1964 - 2022 жылдар аралығында EA₃G Еуро-азиялық тобының нарығында ең маңызды аудандарда озонды пайдалану көлемін бағалауға болады. Әдеби шолу жұмыстарының нәтижесі төмендегі 1.2 - кестеде берілген.

Кесте 1.2 – 1964 - 2022 жылдардағы EA₃G нарығына шолу [15].

Қолдану саласы	Келісімшарттардың саны	Озонаторлардың қуаты (шартты бірліктер)
Ауыз су	650	14351
Өндірістік ағынды сулар	71	1124
Коммуналдық ағынды сулар	9	751
Өнеркәсіп	71	1697
Целлюлозаны ағарту	24	3040
Салқындату мұнаралары	57	86
Ауыл шаруашылығы	6	6
Басқа да қолданулар	4	160
Жалпы	894	21246

Кестеден байқайтынымыз озонды ауыз суды дайындау, целлюлозаны ағарту және коммуналдық ағынды суларды тазалау үшін кең қолданысқа ие екенің байқауға болады.

Ағартуда озонды қолдану мәселесіне толығырақ тоқталу қажет. Целлюлозаны ағарту әдісінде денсаулыққа өте қауіпті диоксиндерді және басқа хлорланған органикалық қосылыстарды жояды, целлюлоза хлормен ағарту үрдісінде түзіледі [7]. Яғни озондау целлюлоза қосылыстарының құрылымын толығымен бұзуға мүмкіндік береді [16].

Қазіргі уақытта диоксиндердің түзілуін болдырмайтын екі целлюлоза ағарту технологиясы бар: ECF технологиясы яғни хлорлы элементті қолданбай, оны толығымен хлор диоксидімен және TCF (толық хлорсыз) технологиясымен алмастыру арқылы жүзеге асыруға болады. Екі технология да қағаз комбинатында дайын өнімде де, ағынды суларда да мазмұнды хлорорганикалық қосылыстар целлюлозаны азайтуға мүмкіндік береді. Бүгінгі күні озонды TCF ағарту технологиясында қолдануға болады, егер ол ECF ағарту технологиясының артықшылығы экономикалық жағынан тиімді болса. Озон және оны суды өңдеу жүйелері саласында қолдану ең маңызды болып табылады. Дегенмен, суды тазалау жүйелерінде тек озонды жалғыз қолданбай оған қосымша реагенттер тотықтырғыштармен немесе дезинфекциялық заттарды комбинациялау өте маңызды болып саналады.

Ауыз суды дайындау бірнеше кезеңнен тұрады. Алғашқылардың бірі яғни негізгі кезеңдері - коагуляция, содан кейін флокуляция. Арнайы коагулянттық реагенттер көмегімен судың құрамындағы қоспаларды бірнеше пайызға дейін азайтуға болады. Коагулянттар ретінде әдетте алюминий сульфаты Al₂(SO₄)₃, темір сульфаты Fe₂(SO₄)₃ және темір хлориді FeCl₃ пайдаланылады. Содан кейін тұнбаға түскен суспензияланған бөлшектер мен бактериялардан сақтану үшін

суды сүзіп тазартады. Содан кейін озон сияқты дезинфекциялау құралдарымен суды залалсыздандыру бактериялар мен вирустарды толық жойады. Ал күшті аммиактың қосылысы суға иіс пен дәмдерді тудырады.

Ағынды суларды тазарту да бірнеше кезеңнен тұрады: суды өңдеу және тазарту үшін механикалық сүзгі қоспаларды 60% пайызға дейін жояды. Ал ерімейтін ластаушы заттар, биологиялық тірі заттар, органикалық қосылыстар және микроорганизмдерді тотықтырғыштармен дезинфекциялау ағынды сулардың құрамындағы патогендік микроорганизмдерді жойады. Сондай -ақ ағынды суларды тазарту кезінде физика - химиялық әдістер қолданылады: флотация (адсорбция - көпіршікті бөлу), коагуляция, сорбция (қатты сорбенттермен тазарту) және озондау.

Озон ауыз және ағынды суды залалсыздандыруға арналған дезинфекциялық құрал, ретінде ғана емес сонымен қатар иістерді кетіру құралы ретінде де, қолданылады. Ол қиын тотығатын органикалық қосылыстарды жоюға белсенді қатысады. Реагенттердің тотықтырғыш және дезинфекциялық қасиеттері бір - біріне жақын байланысқан. Күшті тотықтырғыш заттардың дезинфекциялық қасиеттері да күшті болады. Реагенттердің тотықтырғыш қасиеттері, суды тазарту және дезинфекциялау үшін пайдаланылады. Олардың тотығу мәндері бойынша потенциалдарын бағалауға болады (1.3 - кесте).

Кесте 1.3 – Қолданылатын заттардың тотығу потенциалдары немесе суды тазартуда қолдану перспективасы бар [8,17].

Химиялық заттектер	Тотығу потенциалы (қышқылдық орта), В
Фтор (F ₂)	3,06
Гидроксильді радикал, (ОН [·])	2,8
Оттегі атомы (О)	2,42
Озон (O ₃)	2,07
Сутегі асқын тотығы, (H ₂ O ₂)	1,77
Калия перманганаты (KMnO ₄)	1,7
пероксид радикалы, (RO ₂ [·])	1,7
Гипохлор қышқылы, (HClO)	1,49
Хлор (Cl ₂)	1,35
Хлора диоксиды (ClO ₂)	1,25
Оттегі (O ₂)	1,2

Кестеде келтірілген заттардың ішінен озон және хлор диоксиді 1 қауіптілік класына жатады. Хлор, фтор, калий перманганаты, гипохлор қышқылы және сутегі асқын тотығы - қауіптіліктің екінші класына, гидроксил радикалы да адам ағзасына қауіпті деп саналады.

Кейбір зерттеу мәліметтер бойынша озонмен бірге атомдық оттегі тіпті ағзаға пайдалы [18], ал кейбір зерттеу жұмыстары бойынша – адамдар үшін зиянды және қауіпті [14,19]. Қалай болғанда да, күшті тотықтырғыштар 1.3 - кестеде келтірілген заттар сияқты, оларды пайдалану кезінде қауіпсіздік ережелерін сақтау қатаң талап етеді. Фтордың күшті тотықтырғыш қасиеттерін ескере

отырып, суды фторлау өте тиімді әрі тотығу потенциалының жоғары екенін ескерген жөн. Дегенмен, суды фторлау әдісі ақыр соңында суды фтор аниондарымен ластануына әкеледі. Ол флора мен фауна үшін жойқын зардаптарға әкелуі мүмкін [20]. Фторды қолданудың басқа кемшіліктері уыттылықтың жоғары мәндері және реагенттер құны.

Суды залалсыздандыруда ең көп таралған хлоры бар реагенттер болып табылады. Өйткені құрамында хлор бар реагенттер өзіне тән дезинфекциялық қасиеттері сақталған кезде және өңделгеннен кейін ұзақ уақыт бойы белсенді әрекет етеді. Құрамында хлоры бар дезинфекциялық заттар ең алдымен, мыналарды қамтиды: хлор газы (Cl_2), натрий гипохлориті (NaOCl) және хлор диоксиді (ClO_2). Натрий гипохлоритінің қасиеттерін сыни талдау және оны хлормен салыстыру (Cl_2) гипохлорит пен хлор арасындағы таңдау болып табылады деген қорытындыға әкеледі [21]. Бұл заттардың екеуі де тасымалдау және пайдалану кезінде үлкен қауіп төндіреді. Сондықтан ол сумен жабдықтау жүйесінде өзекті мәселе болып табылады. Ауыз суды дайындау үрдісінде мұндай дезинфекциялаушы затты қолдану ұзақ уақыт сақталатын реагенттерге қарағанда қауіпсіз. Хлор (ClO_2), диоксидін пайдаланған кезде бұл өте улы зат екенін ескеру керек. Ол өндірісте бағасы қымбат және пайдалану орнында жүзеге асырылады, өйткені хлор диоксиді тасымалданбайды.

Судын құрамын хлоры бар реагенттермен өндегенде жанама галогендік қосылыстар пайда болады. Хлорлы суда отыздан астам ұшпа галоген органикалық қосылыстар кездеседі. Олардың кейбіреулерінің мутагендік немесе канцерогендік әсерлері бар [9]. Хлорланған суда келесі қауіпті жанама өнімдердің түзілуі мүмкін [22]:

- хлороформ, трихлорметан деп те аталады (ауыз судағы ШРК 0,06 мг/л, канцероген);

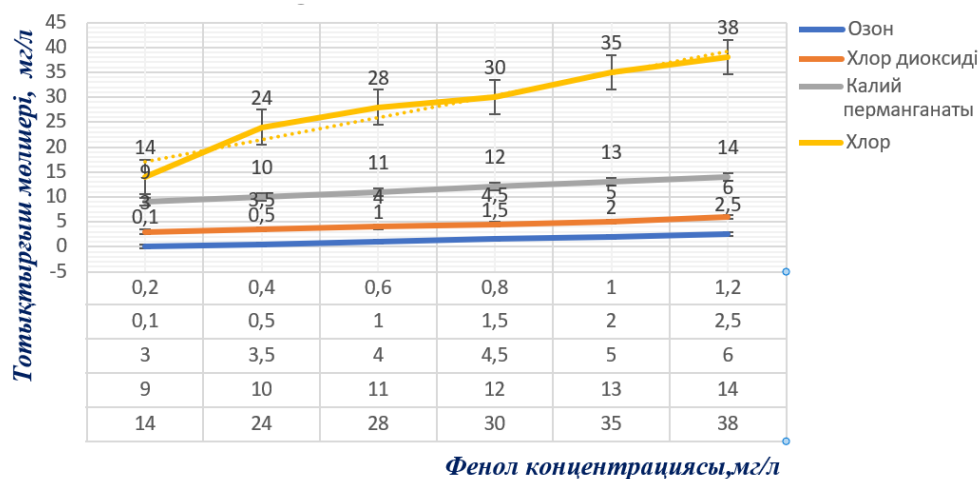
- дихлорбромометан, ака бромодихлорметан (ауыз судағы ШРК 0,03 мг/л, канцероген [23]);

- дибромохлорометан (ауыз судағы ШРК 0,03 мг/л, қауіптілік класы 2 [23]);

- төрт хлорлы көміртек (ауыз судағы ШРК 0,002 мг/л, канцероген [23]).

Озондау әдісі тек залалсыздандыру ғана емес, сонымен қатар химиялық және физикалық (иісті жою, дәмді жақсарту, түсті азайту) баламалы суды тазарту әдісі болып табылады.

Озон судағы кейбір химиялық қосылыстарды басқа тотықтырғыштарға қарағанда жақсы өңдейтін реагент ретінде қолданылады. Мысалы, озон суды фенолдан тазарту үшін жақсы жұмыс істейді. Фенол, ол жер бетіндегі суды ластаушы зат болып табылады. Сонымен бірге озон хлор диоксиді, калий перманганаты және хлор сияқты заттарға қарағанда жақсырақ (1.1 - сурет).



Сурет 1.1 – Фенолдың судағы концентрациясы мен тотықтырғыш мөлшері арасындағы байланыс [9]

Суды фенолдардан тазарту кезінде де жақсы нұсқа озон мен сорбенттерді қолдану, мысалы, белсендірілген көмірді біріктіріп қолдану [8]. Фенолдың озонмен тотығуы жақсырақ сілтілі ортада жүргізіледі [9].

Ағынды суларды тазартуда биологиялық тазартудың комбинациясы озондау канцерогенді жылдам әрі толығымен жоюға мүмкіндік береді. Зиянды заттарды биологиялық өңдеу оларды шамамен тек 70 % пайызын жояды [9].

Құрамында хлоры бар заттарға қарағанда озон суды әлдеқайда жақсы залалсыздандырады. Ол су құрамындағы бактериялардың барлық түрлерін және вирустарды толығымен жояды. Озон энтеровирустар мен лямблия кисталарын [8], колиформаларды және құрамында хлор бар заттардың әсеріне төзімді вирустар жояды [9]. Ішек споралары таяқшалар суда хлорға қарағанда озонмен 3000 есе жылдам жойылады (1.4 - кесте).

Кесте 1.4 – Суды озонмен және хлормен дезинфекциялау уақыты [6].

Көрсеткіш	Суды дезинфекциялаушы	
	Озон	Хлор
Суды залалсыздандыруға арналған минималды доза мг/л	0,1	0,1
Жою үшін қажетті секундтардағы уақыт: 1 литрде 60 000 ішек таяқшасы	5	15000

Кестеде келтірілген деректер озонның тамаша дезинфекциялық қасиеттерінің практикалық мәліметтері болып табылады. Ұзақ қашықтыққа тасымалданатын суды міндетті түрде хлорлау қажет. Себебі озон су құрамында ұзақ әрекет ете алмайды. Судың температурасы 20°C кезінде 10 - 20 минутта озон тез суда ыдырап кетеді де уақыт бойынша әрекеті тоқтайды [8].

Суды тазартуда озонды пайдаланған кезде мынаны есте ұстаған жөн: озон 1 - ші қауіптілік класына жатады, сонымен қатар озондау үрдісі кезінде қосалқы өнімдерінің түзілуін бақылау қажет.

Суды бірнеше сағат озондау кезінде әдетте келесі қосалқы өнімдер түзіледі [22, 23, 24, 25]:

- формальдегид (ауыз судағы ШРК 0,05 мг/л, қауіптілік класы 2 [22]);
- ацетальдегид (ауыз судағы ШРК 0,2 мг/л, қауіптілік класы 4 [22]);
- бромат иондары BrO_3 (Ауыз судағы ШРК 0,01 мг/л, канцероген [23]).

Озонның мұндай дозаларын қолдану суды залалсыздандыру үшін қажет. Жанама өнімдердің мөлшеріне байланысты озонды басқа дезинфекциялық заттармен біріктірген жөн. Ең алдымен мұндай технологиялық схемалар, OH^\cdot гидроксил радикалдары әсерінен түзетін заттардың тотығу реакцияларын күшейту арқылы микроорганизмдерді жояды.

OH^\cdot гидроксил радикалдарының көмегімен күшейтілген тотығудың технологиялық үрдістері «жетілдірілген тотығу процестері» деп аталады (жетілдірілген тотығу үрдістері – AOP`s). Гидроксильді радикалдардың тотығу потенциалы 2,8 В жоғары болады (1.3 - кесте).

Технологияда озон мен ультракүлгін сәулеленуді бірге қолдану AOP`s судың түсінің көбірек төмендеуіне немесе ұлғаюына әкеледі. Ал тотығу қабілеті бойынша озон мен сутегі асқын тотығын бірге пайдалану жақсы нәтиже береді. Салыстырмалы түрде судағы пестицидтер мөлшерінің айтарлықтай төмендеуі суды тек озонмен өңдеген жөн [17].

1.2 Электр разряды теориясының негізгі ережелері

Диэлектрлік тосқауыл разряды (dielectric barrier discharge) - құрылғыларда электродтар диэлектриктер арқылы оқшауланады да плазмада импульстік немесе қайталанатын импульстік газ разряды болып табылады [26]. Тосқауыл разрядта электрондардың орташа энергиясы жоғары (4 - 5 эВ), ал температура разрядтағы газ электрод температурасына жақын [27]. Бірінші эксперименттік тосқауыл разрядты зерттеуді 19 ғасырдың аяғында В.Сименс жасаған, бұл зерттеулер жүйелерде кедергі разрядын пайдаланумен озонның түзілуі байланысты болды. Сименс озонатордағы разряд үшін «тыныш разряд» атауын ұсынды [28]. 20 ғасырдың басында «тыныш разрядты» зерттеуді Э.Варбург жалғастырды. 1932 жылы К.Бас ауа саңылауы арасында электр разряды болатынын анықтады. Мұнда оқшауланған электродтар жеке шағын арналардан тұрады [29].

20 ғасырдың ортасында жапон зерттеушілері К.Хонда, М.Сузуки жоғары жиілікті ток импульстары кезінде пайда болатын диэлектрлік тосқауылмен разряд арасындағы құбылысқа маңызды зерттеулер жүргізді. Жапон ғалымдары бірнеше «тыныш разрядты» құрайтын микроразрядтардағы жеке ток пен кернеудің суреттері мен осциллограммаларын алды (1.2 - сурет) [30].



Сурет 1.2 – Ұзындығы $d = 0,9$ мм және кернеу $V = 10,5$ кВ разряд аралығының осциллографтағы бейнесі [30].

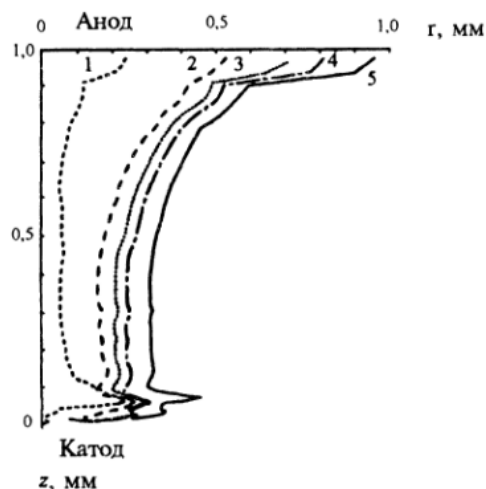
XX ғасырдың 60 - жылдарында Е.Н.Еремин оқшауланған электродтар арасындағы газды разрядты «тосқауыл разряды» ұсынды [27]. Мұндай атау қазіргі кезде техникада қабылданған. Сондай - ақ жалпы қабылданған тосқауыл разрядты жеке разряд ретінде қарастыруға болады. Электрод бетінің әртүрлі нүктелерінде разряд пен олардың арасындағы бос орындарда мезгіл - мезгіл пайда болатын микроразрядтар болады. Чуваш мемлекеттік университетінің зертханасында И.Н. Ульянов айналмалы қондырғымен арнайы жасалған [31]. Стационарлық қондырғыны пайдаланып, арнайы зерттеулер жүргізілді (1.3 - сурет).



Сурет 1.3 – Стационарлық бөгет разрядының фотосуреттері: а - катод металл электрод; б – катод диэлектрлік электрод (кедергі) [32].

1.3 – суретте жұп электродтар арқылы түзілген тосқауыл разряды байқалған. Орналасқан электродтар жұптарының саны мен айналу кедергісі біркелкі, сондықтан электродтарға айнымалы кернеу мен қоректендіру қолданылады. Диэлектриктің айналуына байланысты тосқауыл беті қайта зарядталады, осыған байланысты тосқауылдағы қалдық іздер салдарынан үздіксіз тосқауыл разрядының жануы байқалады. Диэлектрлік кедергіге оң потенциал әсер еткенде тосқауылдың жанындағы кедергі разряды ұзартылған плазма аймағын құрайды (1.3 а - сурет). 1.3 а - суреттегі электродтар арасындағы қашықтық 3 мм, сондай - ақ тосқауылға жақын орналасқан «дақтың» диаметрі 6 мм, биіктігі шамамен 1 мм. Теріс зарядталған диэлектрлік электродпен кеңейтілген бөлікте разряд түзілмейді (1.3 б - сурет). 1994 жылы В.И. Гибалов және Г. Питчтің жасаған ғылыми зерттеу нәтижелері микроразрядтың дамуын

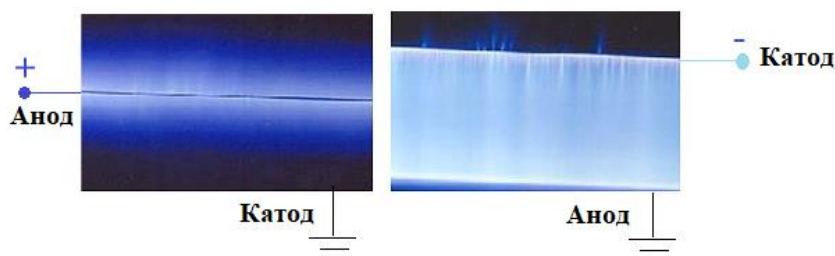
сандық модельдеу нәтижелері диэлектрлік анод және өткізгіш катод үшін жасалған жұмысты анық растайды (1.4 - сурет). Суретте ондаған наносекундтар тәртібі бойынша микроразрядтың даму уақыт көрсетілген.



Мұндағы: 1 - 10,7 нс; 2 - 13,9 нс; 3 - 15,5 нс; 4 - 17,9 нс; 5 - 32,3 нс [5].

Сурет 1.4 – Әр түрлі уақыт сәттердегі $\varepsilon = 5$ кезіндегі микроразрядтық арнаның тиімді радиусы:

Сонымен қатар, тосқауыл разрядының фотосуреттері (1.5 - сурет) ICCD камерасын пайдалану арқылы түсірілді.

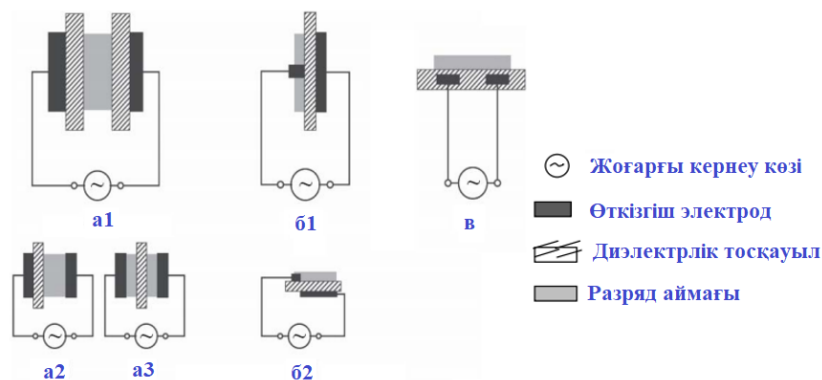


Сурет 1.5 – Жазық - параллель разрядтағы микроразрядтар қатарының фотосуреттерінің фрагменттері [24].

1.5 - суретте бөгеттік разрядтың жалпы бейнесін көруге болады. Разряд бойымен таралған микроразрядтардың белгілі бір санынан аралық микроразрядтар қатарын байқауға болады. Микроразрядтар разрядқа қолданылатын тұтану жиілігіндегі кернеуге пропорционал [27].

Тосқауыл разряд электродтары жүйесінде үш негізгі бөгеттік разряд конфигурацияларының түрлері болуы мүмкін:

- көлемдік кедергі разрядының конфигурациялары (1.6 - сурет, a1 - a3);
- беттік бөгет разрядының конфигурациялары (1.6 - сурет, b1 - b2);
- копланарлы тосқауыл разрядының конфигурациясы (1.6 - сурет, в).



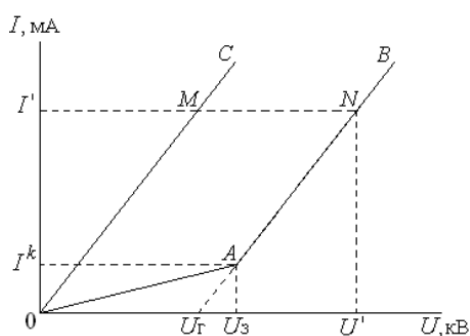
Мұндағы: а – көлемдік кедергі разряды (1 - симметриялы, 2 - асимметриялық, 3 - «қалқымалы» диэлектрик); b – беттік бөгет разряды (1 – симметриялы, 2 – асимметриялық); c – копланарлы кедергі разряды [33]

Сурет 1.6 – Тосқауыл разрядының негізгі жазық - параллель конфигурациялары

Тосқауылдық разряд теориясы макрокопиялық теория ретінде ұсынылды. Ол мерзімді түрде тосқауыл разрядының құрылымын қарастырады, пайда болатын микроразрядтар бірақ тұтастай тосқауылда болатын үрдістердің категориясын сипаттады.

Тосқауылдық разрядтың схемалық моделін қарастыру макрокопиялық эквивалентті схема болып табылады. Диэлектрлік бөгеттің тізбектей жалғанған электр сыйымдылықтары және разряд саңылауының сыйымдылығы кедергі разрядын жағу үшін тұрақты кернеу көзімен ауыстырылады [5], немесе бөгеттік разряд плазмасының сызықты емес кедергісі арқылы шунтталған [33,34].

Бұл қарастырудағы тосқауыл разрядының негізгі сипаттамасы оның вольт - амперлік сипаттамасы болып табылады. Онда ағып жатқан разряд камерасындағы токтың тәуелділігі электродтарға берілген кернеу бойынша сипатталады (1.7 - сурет) [5].



Мұндағы: I^k - разрядты тұтану тогы болып табылады; U_3 – разрядты тұтану кернеуі; U_2 - разрядтың жану кернеуі.

Сурет 1.7 – Тосқауыл разрядтың вольт - амперлік сипаттамасы

Суретте ОАВ түріндегі қисық тосқауыл разряд камерасындағы орташа ток пен кернеу арасындағы тәуелділіктің тиімділігін көрсетеді. Іс жүзінде А нүктесі аймағындағы аудан ауысудың тегіс иілген көрінісін сипаттайды. ОА ауданы кедергі разрядының жоқтығына сәйкес келеді, А нүктесіне өтуге жақын аймағы - бөгеттік разрядтың тұтануы, ал АВ аймағы – разрядтың жану аймағын сипаттайды. MN ұзындығының кесіндісі разряд саңылауындағы тосқауыл разрядының U_г жану кернеуі түсуіне тең. Жану кернеуі, тосқауыл разряды, тұтану кернеуі және ток сондай – ақ тосқауылдың басқа негізгі электрлік сипаттамаларын анықтауға арналған формулаларды келесі әдебиеттерден табуға болады [27]. Қазіргі кезде тосқауыл разрядының теориясында микроразрядтар жиынтығы ретінде разряд макроскопиялық дамуы болып табылады. Нәтижесінде тосқауыл разрядтағы микроразряд үрдістерін зерттейді. Олардың өлшемдері бойынша және микроразрядтардың негізгі параметрлері төмендегі кестеде көрсетілген (1.5 - кесте).

Кесте 1.5 – Тосқауылдық микроразрядтардың негізгі параметрлері [5].

Арнаның қызмет ету мерзімі	10 - 15 нс
Тосқауылдық заряд	$(2 - 10) \cdot 10^{-10}$ Кл
Арна диаметрі	0,3 - 1,0 мм
Ток тығыздығы	~ 100 А/см ²
Каналдағы электрондардың максималды концентрациясы	10^{14} см ⁻³
Арнадағы атомдық оттегінің максималды концентрациясы	10^{16} см ⁻³
Арнада шығарылатын энергия	5 - 10 мкДж
Төмендеген электр өрісінің күші	100 - 150 Td
Микроразрядта түзілетін оттегі атомдарының саны	10^{13}
Орташа электрон энергиясы	3 - 5 эВ

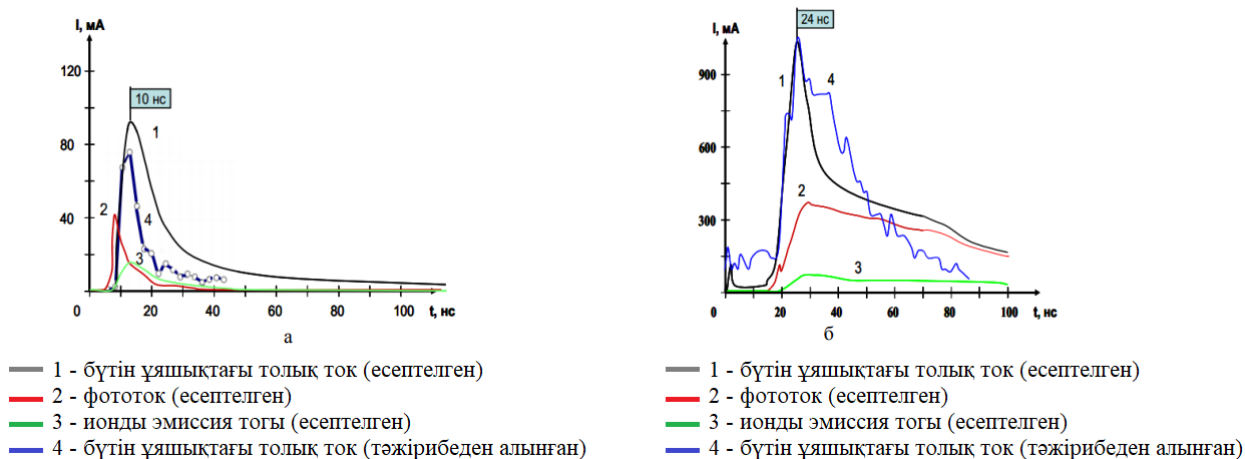
Ескерту: деректер оттегі қысымы 1 атм., температура 300К кезінде алынды электродтар арасындағы разряд саңылауы 1 мм және салыстырмалы диэлектрик кедергінің өткізгіштігі $\varepsilon = 5$.

Сандық модельдеудің арқасында [35] және микроразряд үрдістерінің эксперименттік зерттеулері [37] бөгеттік разряд, енді бөлек микроразряд екені белгілі екі кезеңнен тұрады:

1) шамамен 10 - 20 нс уақыт ішінде микроразрядтың түзілуі және таралуы;

2) уақыт ішінде диэлектриктегі беттік микроразрядтың ауданын қосымша зарядтау шамамен 100 нс.

Сонымен қатар, беттік кедергі разрядын зерттеу кезінде ол ток екені теориялық және тәжірибелік [35] тұрғыда да анықталды. Микроразряд - бұл оң полярлығы бар теріс электродқа қарағанда диэлектрлік (оқшауланған) электроды болды (1.8 - сурет).



Мұндағы: өткізгіш электрод, b – өткізгіш электродтың оң полярлығы [35]

Сурет 1.8 – Тосқауыл разрядының разряд ұяшығындағы токтар: а - теріс полярлықпен

Диэлектрик бетінде бөгеттік микроразрядтардың дамуы фигуралар деп аталатын тармақталған арналар түрінде кездеседі (1.9 - сурет). Лихтенберг есімімен неміс ғалымы Г.К. Лихтенберг, 18 ғасырдың аяғында диэлектриктің бетінде ұқсас фигураларды байқаған.



Сурет 1.9 - Жеке микроразрядтардың фотосуреттері (ICCD) [24].

Жеке микроразрядтардың ағу уақыты ондаған наносекундты құрайды, ал разряд аймағының әртүрлі бөліктерінде ағып жатқан микроразрядтар, олардың арасындағы уақыт ұзақтығына сәйкес келеді. Мұндай микроразрядтардың разрядтық камерасында жылдам бір уақытта ағып жатқан жиынтықты микроразрядтар қатары деп атайды. Микроразрядтар қатарының ұзақтығы микросекундтың оннан бір бөлігін құрайды [5]. Тосқауылдық разрядты озонатор жүйелері екі электродтан тұрады жазық - параллель немесе концентрлік, битпен бөлінген озон түзетін газ өтетін саңылауы бар жүйеден тұрады. Электродтар қатты жазық - параллель секциялық болуы мүмкін және соның ішінде жүйелердегі секциялық электродтар бетінде тосқауыл разрядында озонның түзілуі қалыптасады [39].

Концентрлік электродтары бар озон генераторлары бастапқыда көбірек өнім шығарады. Ішкі электроды металл түтіктен (Siemens жүйесі) немесе шыны

түтіктен жасалған және озон түзетін газ (G Uso жүйесі) электр өткізгіш сұйықтық (Бертело жүйесі) немесе сыммен тікелей байланыста болады. Сыртқы электрод мыналардан тұрады өткізгіш қабатпен қапталған шыны түтік (Otto жүйесі), немесе өткізгіш сұйықтыққа батырылады (Тенард және Бертелот жүйелері) [2,42]. Дәл солай концентрлі айналмалы электродтары бар озонаторлардың [43] конструкциялары бар. Жазық - параллель электродтары бар озонаторларды бөлуге болады статикалық, онда разряд кезінде жұп электродтар салыстырмалы түрде қозғалмайды бір - бірімен [50, 51] және электродтардың біреуі айналатын озонаторлар [52]. Сонымен қатар, XX ғасырдың басынан қазірге дейін кең таралған әртүрлі жазық - параллель электродтары бар озонаторлар құрылымдар – статикалық және айналмалы Otto озонаторлары [2] бар.

Тосқауылдағы озон генерациялау жүйесінің электродтары үнемі жетілдіріліп отырылады және осы саладағы өнертабыштар негізгі екі бағытқа қатты назар аударады: сенімділікті арттыру және озон генерациялау жүйелерінің энергия тиімділігін жақсарту. Сонымен қатар озон генерациялау жүйелерін салқындатуды жақсарту, энергия тиімділігін арттыруға арналған шешімдердің бірі болып табылады. Технологиялық үрдіс кезінде озонды басқа жолдармен электросинтезі мысалы мынадай:

- электродаралық озонның түзілу біркелкілігін арттыру озон синтезінің энергия тиімділігін арттыруға әкелетін кеңістік [60];
- диэлектриктің параметрлері мен қатынасын оңтайландыру озон синтезінің энергия тиімділігін арттыру [66];
- озон генерациялау жүйелерінің электр тізбегінің параметрлерін оңтайландыру озон синтезінің энергия тиімділігін арттыру мақсаты [71].

Бұл ғылыми зерттеу жұмысының мақсаты – тәжі разрядтағы озон синтезі кезінде энергия тиімділігін арттыру болып табылады.

Бұл мақсатқа жету жолында жүйенің электр тізбегінің кедергісінің өзгеруі қарастырылды. Тәжі разрядта озонның пайда болуы, атап айтқанда, электродтарды қолдану арқылы тосқауыл микроразрядтарының электр тізбегінде жоғары кедергілі электродтардың кедергісін өзгерту болып табылады. Энергия тиімділігін арттырудың осы әдісін жүзеге асырудың алғы шарттары озон генерациялау жүйелерін зерттеу жұмысының келесі бөлімдерінде талқыланады.

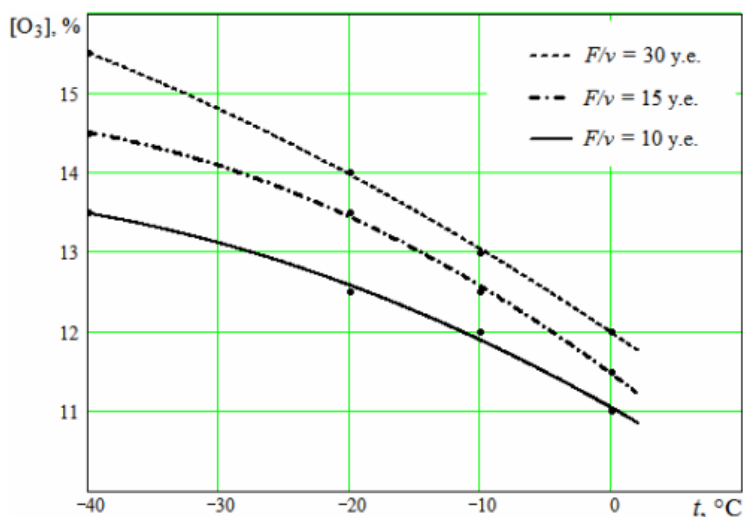
1.3 Озонатор камерасындағы тосқауыл разряды әсерінен пайда болған температураның озон синтезіне әсері

Озон синтезі үрдісінің алғашқы зерттеулері, алдымен электрохимиялық, кейінірек озон өндірудің электрлік әдісімен 19 ғасырдың ортасында жүзеге асырыла бастады - бұл Де Ла Риваның және Мариньяк, В.Сименс, Л.Бабо және басқа ғалымдардың зерттеулерінде көрсетілген. Уақыт өте келе температураның озон синтезі үрдісіне әсері туралы мәліметтер пайда бола бастады. 19 ғасырдың аяғындағы эксперименттік зерттеулер тепе - теңдік концентрациясының төмендеуін анықтады. Озонатор камерасының ішіндегі температураның жоғарылап, өсуі салдарынан озон концентрациясының төмендеуі байқалған [13].

Жиырманшы ғасырдың басында жақсы өнім алу үшін салқындатқыш жүйесін озонаторларға орната бастады [42]. Диэлектриктері бар озонаторлар өнеркәсіпте (Siemens және Halske озонаторлары, Friz жүйесінің озонаторлары және т.б.) қолданыла бастады. Ол кезде өнеркәсіпте сумен салқынлату жүйесі болды.

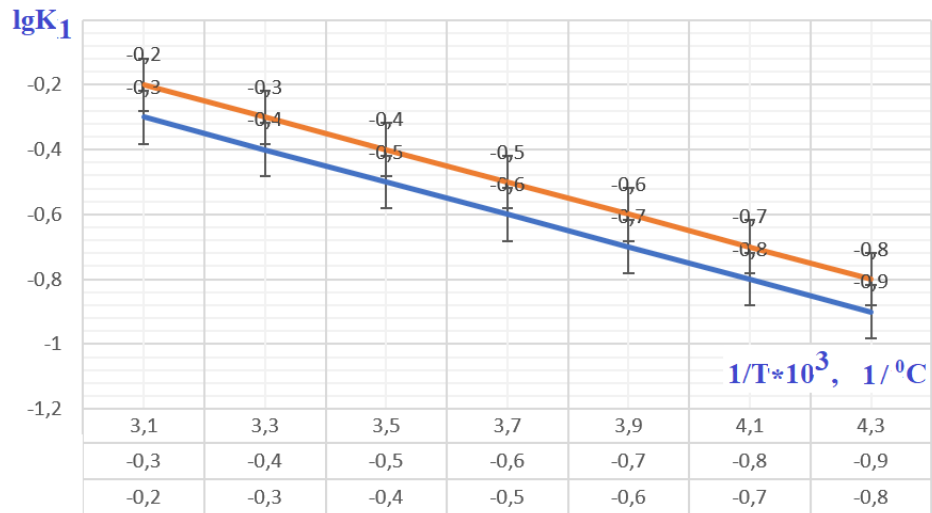
20 ғасырдың ортасында Ю.В. Филиппов пен Н.И. Кобозев тобы озон концентрациясының тәуелділік реакция аймағының көлемінің (F), көлемдік ағыс жылдамдығына (v) қатынасы әртүрлі температурада озон газы болатының байқады [13].

Зерттеу жұмысының тәжірибелік нәтижелері төмендегі 1.10 - суретте көрсетілген онда F/v қатынасының температураға байланысы келтірілген. Суретте қисықтар бойынша температураның жоғарлауына байланысты озон концентрациясының төмендеуі көрсетілген. Эксперименттік мәліметтердің бұл түрінің негізгі құндылығы оларды жобалау үшін пайдалану мүмкіндігінде жатыр және берілген қуаттағы озон генерациялау жүйелерінің жұмысы.



Сурет 1.10 – Озон концентрациясының озонатор электродтарының температурасына тәуелділігі [13]

Сондай - ақ Ю.В. Филиппов пен Н.И. Кобозев озонның түзілу және ыдырауының кинетикалық константаларының орташа мәндерін салыстырды. Онда әртүрлі электродтарды салқынлату жүйесінде электр разряды тек озонның ыдырау константасына әсерін көрсетті. Температура артқан сайын озонның ыдырау константасының мәні артады (1.11 - сурет).



Мұндағы 1 - озонатор электродтарының температурасы бойынша; 2 - разряд саңылауындағы газ температурасы бойынша

Сурет 1.11 – Озонның температура мен ыдырау константасының логарифмінің өзара тәуелділігі [13].

Қоршаған орта температурасы көтерілгенде немесе салқындату жүйесі нашарлағанда химиялық реакциялардың жылдамдығы артады, соның салдарынан озон ыдырайды. Бұл ретте Ю.В. Филиппов пен Н.И. Кобозев озонның ыдырау реакцияларының активтену энергиясын есептеді. Ол шамамен 2 ккал/мольді құрайды. Мұндай төмен белсендіру энергиясы, мысалы, үшін радикалдар мен бос атомдар қатысатын озон реакцияларына тән [13]. Озон түзілу k_0 және озонның ыдырауы k_1 химиялық реакцияларының константалары разрядтың белсенді қуатына және көлемдік ағын жылдамдығына байланысты. Яғни тосқауылдағы озонның пайда болуының кинетикалық теңдеуі бойынша озон түзетін газ разрядын есептеуге болады [2].

$$x_{O_3} = \frac{k_0[x_{O_2}]_2}{k'_0+k'_1} \left(1 - \exp\left[-\frac{k'_0+k'_1}{v}\right]\right) = \frac{k_0[x_{O_2}]_0}{k_1} \left(1 - \exp\left[-\frac{k_1 P}{v}\right]\right), \text{ г/л} \quad (1.1)$$

мұндағы: k_0 – озон түзілу үрдісін сипаттайтын энергия константасы, л/Вт·сағат;

k_0' – озон түзілуі үшін өтпейтін оттегі ағынының шығынын ескеретін тұрақты шама, л/Вт·сағат;

k_1' – озонның ыдырау үрдісін сипаттайтын тұрақты, л/Вт·сағат;

k_1 – озонның ыдырауының энергия константасы, л/Вт·сағат;

$[x_{O_2}]_0 = 0,2836$ г/л - озонатор камерасындағы кірістегі ауадағы оттегінің бастапқы концентрациясы;

$k_0[x_{O_2}]_0/k_1 = x_p$ - озонның тепе-теңдік концентрациясы, г/л;

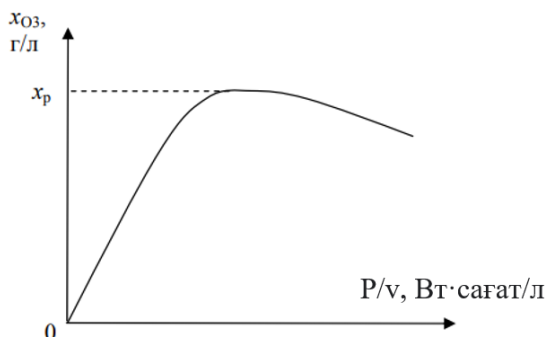
P - разрядтың белсенді (активті) қуаты Вт;

v – озон түзетін газдың көлемдік шығыны, л/сағ;

P/v , Вт·сағат/л мәні меншікті энергия деп аталады [2].

(1) теңдеу $k_0[x_{O_2}]_0/k_1 = x_p$ тосқауыл разрядта түзілетін озон концентрациясының максималды мәні бастапқы концентрацияның белгілі бір мәніндегі оттегі қатынасы екенін көрсетеді.

Озон концентрациясының x_{O_3} спецификалық мәніне тән энергия тәуелділігі P/v 1.12 - суретте көрсетілген.



Сурет 1.12 – Тосқауыл разрядтағы озон концентрациясы меншікті энергияға (P/v) тәуелділігі

Тәуелділіктің бастапқы бөлімінде (1.12 - сурет), меншікті энергия P/v мәнінен аз фактордың мәні болғанда, тепе - теңдікке сәйкес келеді. Озон концентрациясы x_p , қатынасы $k_1 < v/P$ жарамды, және меншікті энергияның P/v артуымен озон концентрациясының x_{O_3} өсуі байқалады. Нақты жағдайларда әрбір газ шығыны үшін кейбір шектеуші қуат күші бар, оның мәні біршама үлкен озонның тепе - теңдік концентрациясына сәйкес келеді. Осыдан кейін меншікті энергия P/v одан әрі артқан сайын, озон концентрациясы x_{O_3} төмендей бастайды. Озонатор камерасының ішіндегі разряд әсерінен туатын температураға байланысты құнның өсуіне яғни артуына байланысты озонның ыдырау энергиясының тұрақтысы (k_1). Озонның тепе - теңдік концентрациясы құндылықты арттыру (1.1) теңдеуіне сәйкес k_1 тұрақтысы мәнің төмендеуіне әкеледі.

Озонатор камерасының ішіндегі разряд әсерінен туындайтын температураның төмендеуі озон синтезінің энергия тиімділігін арттыруға әкеледі. Озон түзілу үшін температураны төмендетуге байланысты әртүрлі әдістер қолданылады, мысалы озонатор жүйесінің конструкциясын реттеу. Озон синтезі үрдісіне арналған жүйені сұйықтықпен салқындататын озонаторлардың арнайы конструкциялары бар. Олардың мақсаты озон концентрациясын тікелей реттеу болып табылады. Сумен салқындатылатын озонатордағы озон концентрациясын бақылау әдісі кейбір зерттеу жұмыстарында ұсынылды. Онда термостатикалық салқындатылған сұйықтықты қолдану арқылы жүйені суытады [74]. Дәл солай озонатор жүйесін салқындату үрдісінде сұйықтың ағу жылдамдығын өзгерту арқылы озон концентрациясын реттеу ұсынылады [75]. Сонымен бірге американдық кейбір озонаторларда тәжді разрядты басқару жүйесінің өнертабысы ұсынылған. Ондағы негізгі мақсат температураны кернеу арқылы реттеу болып табылады. Озонатордағы газ температурасы өз деңгейіне

жеткенде электродтардағы температура тез диссоциацияланатын принцип ұсталған [76].

1960 жылы Мәскеу мемлекеттік университетінің электрохимия, катализ және газ зертханасында толық су арқылы салқындатылған шыны құбырлы озонатор патенттелді [77]. Болашақта мұндай салқындатылған озонаторлардың, конструкциясы Siemens-қа ұқсас озон генераторлары кеңінен қолданылды. Диэлектрлік қабатпен қапталған металл электродтар конструкцияны әлемдік деңгейде тәжірибе жүзінде жетілдіріп, қолданыла бастады [78, 79, 80].

Бүгінгі күні өндірісте озонатордың шығысындағы озон концентрациясын арттыру үшін сұйықтық арқылы салқындату жүйесіне бағытталған бірқатар патенттер бар. Мысалы, конструкция жағынан ұқсас Marmier және Abraham, дискілер түріндегі қуыс электродтары бар озонаторлар ұсынылады. Озонаторлар гофрленген электродтардың ерекшелігімен сипатталады. Ол пішіні толқынды электродтардан жылуды кетіруді жақсартады [81, 82, 83, 84]. Озон синтезінің тиімділігін арттырудың негізгі бағыттарының бірі тосқауыл разрядындағы озонатордың жиілігін арттыру болып табылады. Бұл жағдайда кедергі разрядының активті қуаты кернеу жиілігіне пропорционал [85, 86, 87]. Сондықтан кернеу жиілігінің жоғарылауынан разряд аймағында бөлінетін жылу шығындарының белсенді күші де өседі. Бұл газ камерасындағы разряд әсерінен туындайтын электродтардың қызуының жоғарылауына әкеледі.

Озон шығару аймағында үлкен жылу бөлінуіне байланысты, заманауи жоғары жиілікті озонаторлар сумен салқындатылады. Негізгі мәселе бұл жағдайда жоғары вольтты электрод салқындатылады. Сондықтан салқындату үшін арнайы жүйелер әзірленуде [85]:

- салқындатқышқа суды оқшаулағыш спиральдар арқылы беру;
- салқындату үшін сұйық диэлектрикті пайдалану, мысалы,
- ионсыздандырылған су;
- фреон сияқты төмен қайнайтын сұйықтықпен салқындату.

Озонатордың температурасын төмендету үшін жаңа жүйелер әзірленуде. Сонымен, «Уфа мемлекеттік қызмет көрсету институтының» ғалымдары жоғары жиілікті озонатордағы разряд аймағына түсетін озон түзетін газды салқындату жүйесін ұсынды [84]. Озонатор жүйесіндегі разряд саңылауындағы газ температурасын реттеу кезінде екі көлемдегі газ температурасының көтерілуін анықтау тәсілі мынадай: жалпы озонатордағы разрядтың және жеке параметрлері бойынша тосқауыл разрядты құрайтын микроразрядтар. Бірінші тәсіл - газдың температурасын анықтау «қуат тығыздығы» ретінде озонаторға тән, яғни разряд аймағына бөлінген электродтарға активті қуатқа қатысты [85]. Осыны ескере отырып, разряд көлеміндегі газ температурасының жоғарылауы мына формуламен анықталады:

$$\Delta T = \frac{1}{n} \cdot \frac{P}{S} \cdot \frac{d_n}{a}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1.2)$$

мұндағы P – озонаторда бөлінетін активті қуат, Вт;

S - озонатор электродтарының разряд ауданы, м²;
 d_n – разряд саңылауының биіктігі, м;
 α – электродтардың разряд аймағындағы газдың жылу өткізгіштік коэффициенті, мұндағы

анықталған температура, Вт/°С м;

n - салқындату әдісіне байланысты сандық коэффициент: $n = 1$ үшін мәжбүрлі салқындату болмауы; бір жақты жағдай үшін $n = 3$ суды салқындату; Екі жақты суды салқындату жағдайы үшін $n = 12$.

(1.2) Формуладағы разрядтағы газдың жылу өткізгіштік коэффициентін (α) камтиды. Ол сол аймақтағы және электрод беттерінің қызуын бағалауға мүмкіндік береді және разрядпен тікелей байланысты. Температураның көтерілу мәндері (1.2) формула бойынша есептелген, ондағы мәлімет шығару көлеміндегі газ шамасына сәйкес келеді. Озонатор электродтарын қыздырудың тәжірибелік мәндері осы зерттеу жұмысының келесі бөлімдерінде келтірілген. Сонымен озонатордағы активті қуат мәні $P = 30$ Вт, $S \approx 0,04$ м², $d = 1,0$ мм, салқындатқыштың болмауы және озонды ауадан синтездеу ($\alpha_{\text{ауа}} = 0,043$) мына (1.2) формула бойынша температураның жоғарылауын анықтауға болады:

$$\Delta T = \frac{1}{1} \cdot \frac{30}{0,04} \cdot \frac{1,0 \cdot 10^{-3}}{0,043} = 17,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Озонатор камерасын жобалау үшін разряд ауданы $S = 430$ см² жазық - параллель электродтардағы разрядтың активті қуатының $P = 35$ Вт мәні экспериментте өлшенген температура $\Delta T = 22$ °С. мәніне сәйкес келді.

Екінші тәсіл - бұл [44, 45] әдебиеттерде келтірілген параметр деректеріне негізделген микроразрядта бөлінетін энергияның мәнін білу және микроразряд арнасының диаметрінің мәні арқылы температураның жоғарылауын реттеуге болады. Микроразряд аймағындағы температураны тікелей келесі формула бойынша есептеуге болады:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c \cdot \mu}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1.3)$$

мұндағы ΔQ – бір микроразрядта бөлінетін энергия, Дж; c – озон түзетін газдың жылу сыйымдылығы, Дж/моль °С;

$$\mu = \frac{\pi \cdot r_k^2 \cdot d_n}{22,4 \cdot 10^6 \text{ мм}^3 / \text{моль}} - \text{микроразряд көлемі бойынша озон түзетін газдың}$$

моль саны, мұндағы r_k - микроразряд арнасының радиусы, мм.

Жоғардағы (1.3) формула разряд камерасындағы жылу кедергісін есепке алмайды. Ол микроразрядқа байланысты озонатор және камераның ішіндегі газ температурасының көтерілуін бағалауға мүмкіндік береді. Ауадағы көтерілген жылу сыйымдылығын қабылдай отырып, 21 Дж/моль °С ауа қысымында $p = 1$ атм (1.3) формула бойынша және микроразряд параметрлерінің орташа мәндері үшін

температура 6 °С - қа тең ененің (1.5 - кесте) байқауға болады. (1.2) және (1.3) формулаларды қарастырған кезде олардың арасында өзара қайшылық бар екені анықталды. Разрядтағы температура (1.2) формулаға тікелей байланысты ол разряд саңылауының мәніне пропорционал, ал (1.3) формула бойынша - кері пропорционал.

Кейбір зерттеу жұмыстарында тосқауыл разряд айналасындағы температураға сараптама жұмыстары жасалды [82]. Диэлектрлік тосқауыл бетіне микроразрядтың температуралық әсерін анықтау үшін аналитикалық өрнек алынады:

$$\theta = \frac{2W}{S \tau_{\text{разр}}} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}, \quad (1.4)$$

мұндағы W - микроразряд энергиясы, Дж;

S - микроразрядтың кедергі аймағы, м²;

$\tau_{\text{разр}}$ - микроразряд уақытының тұрақтысы, с;

α – жылу диффузиялық коэффициенті, м²/с;

t – микроразряд уақыты, с.

(1.4) формуладағы микроразрядтың тосқауыл аймағы жалғыз геометриялық параметр болып табылады. Полимерлі материал үшін $\alpha = 1 \cdot 10^{-7}$ м²/с кезінде, $W = 0,5 \cdot 10^{-5}$ Дж параметрлері бар микроразряд үшін, $\tau_{\text{разр}} = 10^{-8}$ с, $t = 7,6 \cdot 10^{-9}$ с, $S = 16,6 \cdot 10^{-6}$ м² формула (1.4) бойынша диэлектрлік тосқауылдық микроразрядтың жылытуы нәтижесінде $\theta \approx 1^\circ\text{C}$ [82].

I тарау бойынша қорытындылар

Электр разряды техника мен технологияның көптеген салаларында қолданылады: флуоресцентті лампалар, бетті өңдеу, тікелей газдарды тазалау, медицинада және тағы басқа өндіріс ошақтарында қолданылады. Әртүрлі жүйеде талап етілген ең үнемді озон түзілудегі нұсқалардың бірі электр разрядын пайдалану болып табылады.

Қазіргі уақытта электр разряд теориясы кеңінен дамыған. Микроразрядтардың кеңістік - уақыттық құрылымы тәжі және тосқауыл разрядынан тұрады және микроразрядтың негізгі параметрлері мыналар: геометриялық өлшемдері, ұзақтығы, тасымалданатын заряды, қарқындылығы, электр өрісі, микроразряд энергиясы. Көптеген зерттеу жұмыстарында тосқауыл және тәжі микроразряд үрдісінің сандық модельдеу нәтижелері бар.

Озон өндеу жүйесінде энергияны тиімді пайдалану үшін камераны салқындату керек (себебі температура көтерілген сайын озонның ыдырау жылдамдығы артады). Озонатордың температурасын төмендетудің дәстүрлі әдісі сумен салқындату жүйесі болып табылады. Су арқылы салқындату жүйелерін жобалау және пайдалану технологиялық үрдісті қиындатады және құнын арттырады. Озонатордағы озонның тиімді түзілуі, сондықтан температураны төмендетудің жаңа әдістерін сұранысқа ие.

2 ТӘЖІ РАЗРЯДҚА НЕГІЗДЕЛГЕН ОЗОНАТОР ЖҮЙЕЛЕРІНІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

2.1 Микроразряд арқылы тасымалданатын электр энергиясының мөлшері

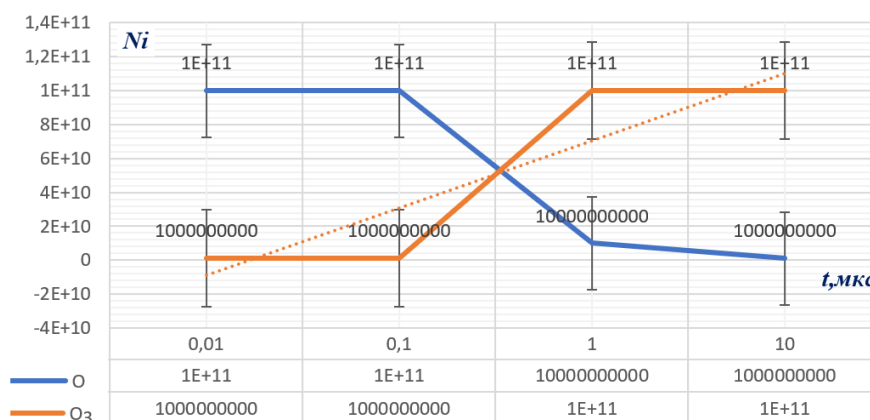
Электр разряды арқылы тасымалданатын заряд оттегі молекуласынан озонды синтездеуге арналған негізгі сипаттамалардың бірі болып табылады. Жалпы заряд тасымалданатын разрядтардан тұрады, және жеке микроразрядтар сәйкесінше олардың санымен анықталады. Бір микроразряд арқылы берілетін заряд мөлшері шамамен 10^{-9} Кл (1.5 - кестені қараңыз). Оттегідегі озонның электросинтезіндегі негізгі реакция диссоциация болып табылады (оттегі молекулалары):



Бұл реакция озонның түзілуін шектейді [5]. Озонның қалыптасуы үш шаманың нәтижесі болып табылады атомдық оттегінің (O), оттегі молекулаларының (O_2) және басқа бөлшектердің соқтығысуы (M):

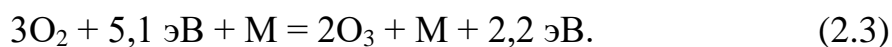


Неғұрлым көп оттегі атомдары түзілсе, соғұрлым озон шығымы артады. (2.1) реакцияға сәйкес атомдық оттегінің мөлшері қажетті бос электрондар санымен және оттегі молекулаларының энергиясы арқылы диссоциациялануымен анықталады. Жоғары электрондардағы энергия саны электр өрісінің күшімен анықталады. Нәтижесінде оттегінің диссоциациялануы өріс кернеулігіне және электрон концентрациясына тәуелді [5]. Ток және тиісінше микроразряд заряды бірдей параметрлерге байланысты. Екінші жағынан, атомдық оттегінің концентрациясының таралуы және озон шамамен [25] өзара сәйкес келеді, ол төмендегі 13 - суретте көрсетілген.



Сурет 2.1 – Оттегі атомдарының (O) және озон (O_3) микроразряд арнасында молекулаларының Ni жалпы санының уақыт бойынша өзгеруі [25].

Озонның түзілуіне қажетті энергияларды механизм арқылы белгілейік (2.1) және (2.2) реакциялар бойынша, сондай - ақ нәтижесінде озонның түзілуі кезінде соқтығыс әсерінен бөлінетін механизмді мына түрде болады:



Екі озон молекуласының түзілу жылуы $2,96 \text{ эВ}$ ($4,74 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$), жүзеге асыру үшін қажетті энергияның теориялық мәні бойынша (2.1) және (2.2) реакцияларының механизмі шамамен $5,15 \text{ эВ}$ [86]. Сондықтан онда $2,2 \text{ эВ}$ артық энергия қалыптасады ол жылу түрінде бөлінеді. Осылайша, тиімділіктің теориялық мәні диссоциация арқылы озонның электросинтезінің механизмі разряд кезінде оттегі молекуласының $57,5\%$ пайызын құрайды [5]. Электрсинтез үрдісі үшін жалпы озонның мұндай тиімділік мәні артық бағаланады, өйткені берілген қарастырылып отырылған энергия $2,2 \text{ эВ}$ (артық энергия) шығынының бір ғана факторын – түзуді ескереді. Бөлінген жылу энергиясы, жоғарыда айтылғандай озон түзілу механизміне яғни озонның ыдырауына кері әсер етеді. Озонның ыдырау механизмін екі түрдегі ықтимал реакциялар арқылы көрсетуге болады [5]:



(2.1) және (2.2) өрнектерде озон түзілу реакциялары температураға тәуелді емес, сәйкесінше озон түзілу константасы температураға байланысты [87]. Әдебиеттерде озон (2.4) және (2.5), сондай - ақ озонның ыдырау реакциялары және константасының мәні температураға айқын тәуелді болды. Сондықтан эксперименталды ұсынылған нәтижелерде озон температураның жоғарылауына байланысты кеми бастайды [87]. Зерттеу нәтижелер төмендегі графикте берілген (2.2 - сурет).

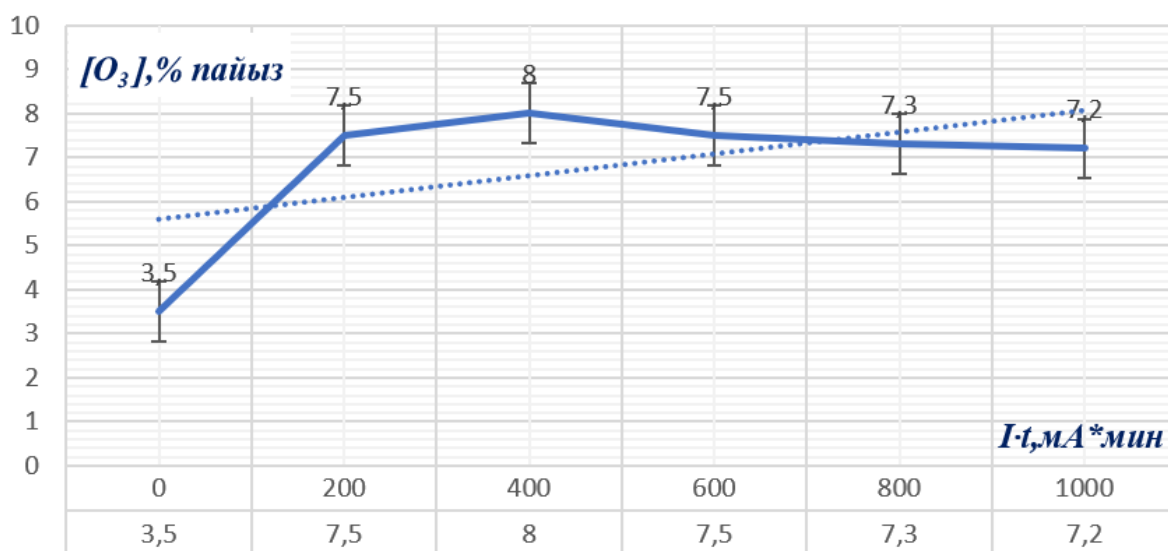
Графикте (2.2 - сурет) 3 бөлімді ажыратуға болады:

1) бастапқы түзу сызықты, мұнда озонның ыдырауы шамалы және озон синтезі $q = I \cdot t$ электр энергиясының мөлшеріне пропорционалды екені анық байқалады;

2) ортаңғы бөлім, мұнда синтез және ыдырау үрдістері сәйкес келеді;

3) соңғы құлау секциясы, мұнда қызып кетуі айтарлықтай озонатор мен озонның ыдырау реакциялары қарқындырақ. Осылайша, реакция арқылы синтезделген озон мөлшері (2.1) газ разряды арқылы өтетін электр энергиясының мөлшерімен анықталады (озон генераторының аймағы). Озон генераторының үрдісі стационарлық күй болса, онда бұл қорытындыда орташа ток ($I_{\text{орташа}}$) үшін де жарамды яғни разряды арқылы өтетін токтың орташа мәнінен артық. Камерада оттегі молекулалары түзілу реакциясына қатыса алатын оттегі

атомдары мен диссоциацияланады және озонатор шықпасында соғұрлым озон көп болады.



Сурет 2.2 – Өнімге байланысты озон синтезінің жалпыланған кинетикалық қисығы (газдың разряд аймағында болған уақытындағы тәжі разрядтағы тогы) [87].

Бұл жағдайда озонаторлардың электрлік теориясына сәйкес [86, 87] разрядты озонатор камерасы арқылы өтетін орташа токты мына формуламен анықтауға болады:

$$I_{\text{орт.}} = \frac{2}{\pi} U_0 \omega C_{\text{об}}, \quad (2.6)$$

мұндағы $\omega = 2\pi f$ – разрядтық камерадағы циклдік кернеу жиілігі; U_0 - разрядтық камерадағы кернеудің амплитудалық мәні.

$C_{\text{об}} = \frac{C_6 C_{\pi}}{C_6 + C_{\pi}}$ - диэлектрлік кедергілердің жалпы сыйымдылығы және сериялық қосылымдағы разряд саңылауы;

$C_6 = \frac{\epsilon_6 \epsilon_0 S}{d_6}$ - озон камерасындағы диэлектрлік кедергілердің разрядының сыйымдылығы;

$C_{\pi} = \frac{\epsilon_0 S}{d_{\pi}}$ - разряд саңылауының электр сыйымдылығы.

мұндағы S - озонатор камерасының разряд аймағы,

ϵ_6 – кедергілердің есептік салыстырмалы өткізгіштігі,

d_6 - диэлектрлік кедергілердің есептік қалыңдығы,

d_{π} – разряд аралығының биіктігі.

Разряд арасындағы математикалық байланысты дұрыс анықтау үшін озонатор камерасы арқылы өтетін орташа токтың мәні, биіктігі, электродтардың алшақтығын ескеріп, белгілі бір формулаға жүгініп шешуге болады. Сол сияқты

разряд саңылауындағы кернеу арасындағы байланыс (кернеу жану) және озонаторға берілетін қоректендіру кернеуінде ескеру керек [86]. Орташа электр разрядының жану кернеуінің мәнін мына формуламен анықтауға болады:

$$U_r = \frac{2U_0 C_{об}}{\pi C_{п}} = \frac{2U_0}{\pi} \frac{C_6}{C_6 + C_{п}} \quad (2.7)$$

Арнайы разряд аралықтағы кернеу мәні озонатордағы разряд камерасының жабдықтау параметрлері бойынша қорек көзінің кернеуіне сәйкес болады:

$$U_0 = \frac{\pi U_r}{2} \frac{C_6 + C_{п}}{C_6} \quad (2.8)$$

Тиімді шаманың эмпирикалық формуласы да бар онда разрядтың биіктігіне байланысты разряд саңылауындағы кернеу аралығын былай есептеуге болады [86]:

$$U_{г.эфф.} = 0,7 + 1,9 d_{п}, \text{ кВ} \quad (2.9)$$

(2.9) өрнек озонаторға арналған нақты шама арқылы жазылуы мүмкін және алынған ток пен кернеу сипаттамаларына сәйкес. Жұмыс жағдайлары разряд саңылауының әртүрлі мәндерінде келтірілген (7 - сурет). Разряд саңылауындағы кернеудің орташа мәні мына формуламен анықталады:

$$U_{г.орт.} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{г.эфф.} = 0,63 + 1,71 d_{п}, \text{ кВ} \quad (2.10)$$

(2.8) және (2.10) формулаларды (10) формулаға ауыстырғаннан кейін өрнекті (2.11) аламыз қоректендіру жиілігіне байланысты озонатордағы орташа ток үшін кернеу мен разряд аралығының параметрлері:

$$I_{ср} = (0,63 + 1,71 d_{п}) \cdot \omega \cdot \frac{\varepsilon_0 S}{d_{п}} = \varepsilon_0 \omega S \cdot (1,71 + \frac{0,63}{d_{п}}) \quad (2.11)$$

Разряд саңылауының биіктігі нөлге тең болғанда, орташа ток арқылы өтеді осы кезде озонатор диэлектрлік тосқауылдармен шектеледі және ол (2.12) өрнек бойынша анықталады:

$$I_{орт}^{d_{п}=0} = \frac{2}{\pi} U_0 \omega C_6 = \varepsilon_0 \omega S \cdot \frac{2U_0 \varepsilon_6}{\pi d_6}. \quad (2.12)$$

Осылайша, разрядтық озонатор камерасы арқылы өтетін орташа ток артады ал разряд саңылауының биіктігі ток мәніне дейін төмендейді, ол жоғарыдағы (2.12) формула бойынша анықталады. Ең төменгі ток мәні

(диэлектрлік кедергіде) бос орындарда және нөлге тең аралықта сыйымдылықпен шектеледі.

Алынған теориялық қорытындылар жақсы эксперименттік нәтижелерді растайды. Ғылыми әдебиеттерде зерттеу жұмыстарының [27] вольт - амперлік сипаттамаларын ұсынады онда разряд биіктігінің әртүрлі мәндерінде алынған кедергі разряды интервалы анықталды.

Белгіленген деңгей үшін осы сипаттамаларды қарастырғанда кернеуді, келесі заңдылықпен анықтауға болады: биіктіктің ұлғаюына байланысты разряд саңылауы 0,5 мм-ден 3,5 мм-ге дейін, жағдайда орташа ток төмендейді. Озонаторда разряд саңылауы биіктігінің одан әрі ұлғаюы кезінде токтың төмендеуі тоқтайды.

Екінші жағынан, зерттеу бойынша эксперименттердің нәтижелері разряд саңылауы биіктігінің микроскопиялық сипаттамаларға әсері анықталды. Электр разряды – бөлек берілген зарядтың мәніне тәуелділігі микроразряд аралығының биіктігі бойынша анықталады. Бұл мәліметтерге сәйкес разряд саңылауының биіктігін тасымалданатын заряд мөлшерін арттыру кезінде бөлек микроразряд жоғарылайды. Сондай - ақ кейбір зерттеу жұмыстары нәтижесінде эксперименттерде разряд саңылауы биіктігінің ұлғаюын байқауға болады. Осы кезде анодтың жанындағы микроразряд арнасының диаметрінің ұлғаюы орын алады [27].

Мұны разрядтың биіктігінің жоғарылауымен түсіндіруге болады. Электродтарды алшақтығы, разряд камерасы арқылы өтетін орташа ток азаяды. Бұл құбылыс разряд саңылауы биіктігінің жоғарылауымен түсіндіріледі. Жоғарыда сипатталған құбылыстардан басқа, қорек көзінен беріліп отырылған генератор жиілігінің төмендеуі байқалады. Микроразрядтар сериясы, ол эксперименталды түрде белгіленген [27]. Нәтижесінде, микроразряд арқылы берілетін зарядтың ұлғаюына қарамастан, разряд камерасындағы микроразрядтармен тасымалданатын жалпы токтың төмендеуін байқауға болады. Озон түзілу механизміне электр тогының қосқан үлесін ескере отырып (4 формула), разряд биіктігінің ұлғаюымен қорытынды жасауға болады. Алшақтық озонатор арқылы өтетін токты да азайтады да осы кезде өндірілген озон мөлшері азаяды. Осы тұжырымға қатысты [82,88] ғылыми әдебиеттерде келтірілген эксперименттік зерттеулердің нәтижелеріне сүйенсек озонның электросинтез үрдісі кезінде электр разрядына жақын орналасқан микроразрядтың ұзартылған бөлігінде көбірек болатынын анықтаған. Осы ғылыми зерттеу жұмыстарында ең өнімді жүйе екені айтылады. Яғни озон генераторлары ең аз разряд биіктігі бар озонаторлар болып табылады (онда микроразряд биіктігі шамамен 0,5 мм). Соңында, тасымалданатын электр энергиясының рөлін ескере отырып, микроразряд аймағында озон синтезі бойынша келесі қорытынды жасауға болады:

- электр разряды тогының, сонымен қатар бөлек токтың ұлғаюымен микроразряд аймағында диссоциация нәтижесінде оттегі атомдарының саны артады. Разряд саңылауындағы оттегі молекулалары, бұл потенциалды

арттырады яғни озонның көп мөлшерде пайда болу мүмкіндігіне оң нәтиже береді;

- электр разряд тоғының максималды мәні және озон синтезінің энергия тиімділігіне қол жеткізуге болады (микроразрядтар қатарының қайталану жиілігінің артуы нәтижесіндегі интервалдарда);

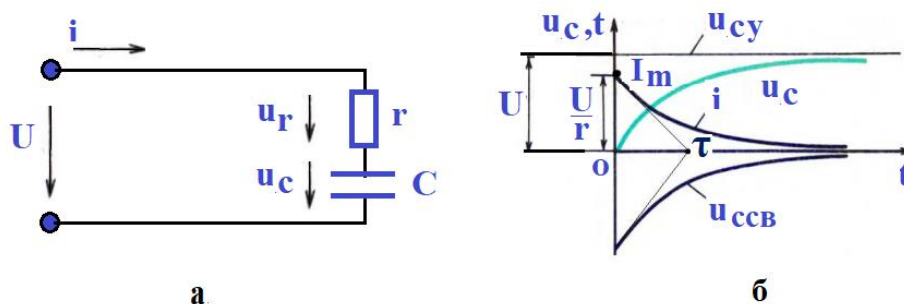
- разряд ара қашықтығын ұлғайту арқылы электр разрядының энергия тиімділігін арттыруға болады. Берілген электр энергиясының (ток) сомасына байланысты шектеу бар: мысалы

- бір жағынан диэлектриктің сыйымдылығы, ал екінші жағынан жылдамдықтың артуы жылу түрінде бөлінетін артық энергия нәтижесінде озонның ыдырауын арттырады (озонның электросинтезінде);

- түзілу реакциясы нәтижесінде пайда болатын озон мөлшері электр разряды арқылы тасымалданатын электр энергиясының мөлшеріне пропорционал.

2.2 Активті кедергінің электр қуатын зарядтау үрдісіне әсері

Жеке электрлік разрядындағы микроразрядының дамуы екі кезеңнен тұрады. Электродтағы электр разряды бар аумақтың аралығы және озондау камерасының сыйымдылығы зарядымен диэлектриктегі беттік микроразряд. Өтпелі кезеңнің параметрлеріне активті кедергінің әсерін қарастырайық. Ол үшін rC тізбегінің бөлігі болып табылатын кейбір электрлік сыйымдылықты зарядтау үрдісі, тұрақты кернеу көзіне қосайық (2.3 - сурет).



Мұндағы а) өтпелі үрдіс сұлбасы; б) ток және кернеу қисықтары [89].

Сурет 2.3 – rC тізбегінің бөлігі болып табылатын сыйымдылықты тұрақты кернеу көзінен қосу

Зарядтау кезінде конденсатордағы кернеу артады (төмендегі өрнекке сәйкес өтпелі үрдістің заңдылығы бойынша) [89].

$$u_c = u_{cу} + u_{cсв} = U - Ue^{-t/\tau} = U(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.13)$$

мұндағы $U_{cу} = U$ - конденсатордағы кернеудің тұрақты мәні, кернеу көзіне тең мәні;

$$u_{cсв} = -Ue^{-t/\tau} - \text{конденсатордағы еркін кернеу;}$$

$\tau = rC$ - тізбектің уақыт тұрақтысы ($1/\tau$ – өшу коэффициенті). τ уақыт тұрақтысына графикалық анықтау жүргізілгенде кез келген нүктедегі өтпелі үрдіс қисығына жанама болып келеді. 2.3, б - сурет үшін τ анықтау, нүктеде U_C кернеу мен ток i қисықтарының жанамалары жүргізіледі $t = 0$.

Экспоненциалды ыдыраудың өтпелі уақыты тәжірибелік дәлдік 3τ тең қабылданады [89].

Конденсаторды зарядтау үрдісінде (сондай - ақ разрядтау кезінде) ток максималды болады үрдістің басында, содан кейін сәйкес экспоненциалды түрде төмендейді.

$$i = C \frac{du_c}{dt} = \frac{U}{r} e^{-t/\tau} = I_m e^{-t/\tau} \quad (2.14)$$

мұндағы r – конденсатор заряд тізбегінің активті кедергісі, I_m - конденсатор зарядының тоғының максималды мәні.

Энергетикалық тұрғыдан алғанда, конденсаторды зарядтау үрдісінде жартысы энергия жылуға айналады, ал қалған жартысы конденсаторда сақталады (2.15), (2.17) теңдеулері бойынша:

$$\int_0^{\infty} U i dt = \int_0^{\infty} (u_r i + u_c i) dt = \int_0^{\infty} r i^2 dt + \int_0^U C u_c du_c \quad (2.15)$$

$$U \int_0^{\infty} i dt = U \int_0^U C du_c = CU^2 = \int_0^{\infty} r i^2 dt + \frac{CU^2}{2} \quad (2.16)$$

$$\int_0^{\infty} r i^2 dt = CU^2 - \frac{CU^2}{2} = \frac{CU^2}{2} \quad (2.17)$$

rC тізбегінің бөлігі болып табылатын конденсаторды тұрақты кернеу көзінен зарядтау сұлбасы заряд тізбегінің кедергі уақыттының пропорционалды ұлғаюына әкеледі. Зарядталған ток бір мезгілде максималды мәнге жетеді. Бұл жағдайда (2.17) өрнекке сәйкес конденсаторды зарядтау үрдісінде жылу шығындары RC тізбегінің кедергісіне тәуелді емес.

Қарастырылған өрнек бірінші кезеңде электр қуатын зарядтау үрдісін көрсетеді ал екінші диэлектриктегі беттік ауданы бойынша микроазрядтың соңғы кезеңі болып табылады. Бұл жағдайда разрядтағы кернеу аралықты шынында да, тұрақты деп санауға болады. Қоректендіру кернеуінің өзгеру жылдамдығы 0,1 - 1 кВ/мкс тәртібінен жоғары емес. (2.15), (2.17) өрнектеріне сәйкес Джоуль шығындарына байланысты зарядтау үрдісі тиімділігі шамамен теориялық тұрғыда 50% пайызға тең. Тиімділік мәні озонның электросинтез үрдісінде, де жылу түріндегі энергияның жоғалуына байланысты. Сәйкес конденсаторды зарядтау үрдісінде ток өткізетін зарядты есептейік келесі формула бойынша:

$$q = \int_0^{\infty} I_m e^{-t/\tau} dt = I_m \int_0^{\infty} e^{-t/\tau} dt = I_m \tau = \frac{U}{r} rC = CU \quad (2.18)$$

(2.18) өрнек конденсатор зарядының нақты шамасын көрсетеді. Ол зарядтау үрдісінде тасымалданатын зарядтың мәні немесе конденсаторды разрядтау rC тізбегінің кедергісіне байланысты емес.

Электрлік микроразряд үрдісін қарастырған кезде қажет микроразряд арнасына берілетін U_p (резистордағы кернеу) кернеуінің аз екенін ескеру керек. Тәжілік микроразряд үрдісін қарастырған кезде U_p кернеуін қарастыру қажет. Ол микроразряд арнасына қолданылады және қорек көзі кернеуі $U_{\text{қорек}}$ (қорек көзі кернеуі) электродқа жақын кернеудің төмендеуі деңгейіне дейін $U_{\text{эл}}$ дейін аздау болады. Яғни анодтағы $U_{\text{ан}}$ (анод) кернеу $U_{\text{кат}}$ (катод) катодтағы кернеуден төмендеу тұрады. Олардын шамасын келесі өрнектер бойынша былай анықтауға болады.

$$U_p = U_{\text{қорек}} - U_{\text{эл}} \quad (2.19)$$

$$U_{\text{эл}} = U_{\text{кат}} + U_{\text{ан}} \quad (2.20)$$

Сонда микроразрядтық токтың максималды мәні үшін өрнек төмендегідей болады:

$$I_m = \frac{U_{\text{қорек}} - U_{\text{эл}}}{r_p}, \quad (2.21)$$

мұндағы r_p – микроразряд арнасының активті кедергісі.

Микроразрядтың әсерінен электрод айналасында бөлінетін жылудың болуы мүмкін. Электродқа жақын кернеудің төмендеуі және пайдалануды ескере отырып (2.15), (2.18) өрнектерді яғни электродқа түсетін кернеуге байланысты энергияның жоғалуын былай ықшамдауға болады.

$$Q_{\text{эл}} = \int_0^{\infty} U_{\text{эл}} i_p dt = U_{\text{эл}} \int_0^U C_p u_p du_p = U_{\text{эл}} C_p U_p = U_{\text{эл}} q_p = U_{\text{эл}} I_m \tau_p \text{ Дж} \quad (2.22)$$

Беттік заряд тоғының ағынынан болатын микроразрядтағы энергия шығындары:

$$Q_p = \int_0^{\infty} r i_p^2 dt = \frac{C_p U_p^2}{2} = \frac{q_p U_p}{2} = \frac{I_m \tau_p U_p}{2} = \frac{C_p U_p^2}{2} \text{ Дж} \quad (2.23)$$

мұндағы: C_p – микроразрядтың электрлік сыйымдылығы,

q_p – беттік микроразрядты зарядтау үрдісінде тасымалданатын заряд,

$\tau_p = r_p C_p$ – микроразряд уақытының тұрақтысы.

(2.23) өрнектен микроразряд бетіндегі зарядтау үрдісі екенін көруге болады, жалпы Джоуль шығындары заряд тізбегінің кедергісіне тәуелді емес.

Микроразряд тізбегінің белсенді кедергісін арттыруға болады, мысалы разрядтық камераның электродтарының жоғары кедергісі (r_d) бар.

Микроразрядтың уақыт тұрақтысы $\tau_{p2} = (r_p + r_d)C_p$ мәніне дейін артады. Заряд тоғының ағынынан болатын энергия шығыны екі бөліктен тұрады: микроразряд арнасындағы $Q_{дж1}$ энергия шығындары және электродтардың кедергісі бойындағы энергия шығындары $Q_{дж2}$. Бірінші жағдайды жуықтағанда микроразряд параметрлерінің сызықты еместігін есепке алмағанда бұл шығындар (2.24), (2.26) өрнектерге сәйкес анықталады:

$$Q_p = Q_{дж1} + Q_{дж2} = \frac{C_p U_p^2}{2} \quad (2.24)$$

$$Q_{дж1} = \int_0^\infty r_p i_p^2 dt = r_p I_m^2 \int_0^\infty e^{-2t/\tau_{p2}} dt = r_p I_m^2 \frac{\tau_{p2}}{2} = \frac{I_m^2}{2} r_p C_p (r_p + r_d) \quad (2.25)$$

$$Q_{дж2} = \int_0^\infty r_d i_p^2 dt = r_d I_m^2 \frac{\tau_{p2}}{2} = \frac{I_m^2}{2} r_d C_p (r_p + r_d) \quad (2.26)$$

мұндағы r_d - электрод кедергісінің өскен мәні. Жалпы энергия (Джоуль) шығыны кедергіге тәуелді емес. Джоульдің қайта бөлінуін анықтау энергияның шығыны үшін k коэффициентін сипаттауға ыңғайлы, себебі беттік заряд үрдісінің параметрлеріне пропорционалды.

$$k = \frac{r_p + r_d}{r_p}. \quad (2.27)$$

Микроразряд тізбегіне активті кедергі r_s қосқанда арна арасында бөлінетін жылуды қайта микроразряд және қосымша кедергі арқылы бөлуге болады:

Түтіктегі жылуды жоғалту $Q_{дж1}$ микроразрядта k есе азаяды, ал қосымша кедергіде жылу мөлшері былай анықталады $Q_{дж2} = Q_p - Q_{дж1}$. Бұл үрдісте ток амплитудасы беттік микроразрядтың заряды әсерінен k есеге азаяды, ал уақыт тұрақтысы зарядтау үрдісі кезінде k есеге артады.

II тарау бойынша қорытындылар

Электр разрядтағы озонның электросинтезі күрделі мәселе болып табылады. Себебі өзара байланысқан электрлік, химиялық және жылулықтан тұратын құбылыс үрдістері әсерінен. Өндірілген озон мөлшері электр разряды (тәжі немесе тосқауыл) үрдісінде тасымалданатын электр энергиясына пропорционал.

Озон электросинтез кезінде жүретін негізгі химиялық үрдістер - бұл оттегі молекулаларының диссоциациялануы, молекулалардың түзілу үрдістері және озон молекулаларының диссоциациялануы. Оттегінің диссоциациялануы кезінде озон түзіледі, оның шамамен жартысы разряд саңылауында тасымалданатын жылу әсерінен жоғалады.

Электр разряды барысында тұтастай алғанда, сонымен қатар үрдісте жеке микроразрядтардың ағыны кезінде электр энергиясының жоғалуы байқалады. Мысалы разрядтық саңылаудағы жылу диссипациясының нәтижесінде және

электродқа жақын кернеудің төмендеуі әсерінен. Бұл энергия шығындары тікелей берілген электр заряды және тізбектің кедергісіне тәуелді емес оның шығындалуы разряд және микроразрядтардың кедергісіне байланысты.

Микроразряд тізбегінің параметрлерін өзгерту мысалы, активті кедергі жеке импульстердің параметрлеріне әсер етуге мүмкіндік береді (микроразрядтарға). Осылайша, микроразряд тізбегінің белсенді кедергісінің жоғарылауымен бір мезгілде максималды ток импульсінің төмендеуі байқалады ол микроразряд импульсінің ұзақтығын арттырады.

Физикалық мағынада тізбектің активті кедергісінің жоғарылауымен микроразрядта екі негізгі құбылыс пайда болады:

- микроразрядпен берілген зарядты уақыт бойынша қайта бөлу, беттік микроразрядты зарядтау үрдісінің уақытын ұлғайту арқылы жалпы шығынның өзгермейтіндігі;

- микроразрядтық арна арасындағы жылу генерациясын қайта бөлу. Сәйкесінше микроразряд тізбегіне енгізілген қосымша кедергі арқылы, яғни электр тізбектері теориясының заңдарына сүйеніп.

Осылай микроразряд тізбегінің параметрлерін реттеу (азайту немесе көбейту) арқылы озон синтезінің энергия тиімділігін арттыруға болады.

3 ЖОҒАРЫ ЖИЛІКТІ ТӘЖДІ РАЗРЯДТЫ ОЗОНАТОР ЖҮЙЕСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛДЕУ

3.1 Мәселенің алға қойылған тапсырмасы

Электр разрядына негізделген озонатор генераторының конструкциялық құрылымы құбырлы және жазық - параллель геометриясы қазіргі кезде кең таралған. Алайда, олардағы разрядтық үрдістер негізінен бірдей, сондықтан ғылыми зерттеу жұмысында тек жазық - параллель электродтары бар озонаторларын зерттеу қарастырылған. Олар электродтардың конструкциясы бойынша бір - бірінен ерекшеленеді. Мұндай озон генерациялау жүйелерін үш негізгі топқа бөлуге болады:

- үздіксіз жазықтық - параллель электродтармен;
- көлемдік разряды бар секциялы электродтар;
- беттік разрядпен.

Разрядтық үрдістердің дамуы тұрғысынан топтардың бір - бірінен айырмашылығы электродаралық сыйымдылықтың (C_3) әр түрлі мәнінде жатыр. Электродаралық сыйымдылықтың бірнеше түрі бар: олардың ішінде ең жоғарғы қатты электротты конструкция (озонаторы) болып табылады. Ал ең кіші (C_3) озонаторларына тән секциялы электрод екенің атап өткен жөн. Төмендегі 3.1 - суретте құрылғы схемалық түрде көрсетілген. Онда әртүрлі конструкциядағы жазық - параллель электродтары бар озонаторлары көрсетілген.

Шетелдерде мысалы Ресейде, Қытайда, АҚШ - да, Жапонияда және Францияда қолданылып жүрген озонаторларда сыртқы және тәжіленетін электродтар арасында диэлектрлік кедергі орналасқан. Озонаторлардың мұндай түрі 3.1 а және б – суреттерде (а - жекеленген және б -топтастырылған түрі) келтірілген. Озонатор диэлектрлі шыны түтік (кедергі) ретінде орнатылған, бұл шыны түтіктің сыртына спираль болып тәжіленуші сым оралған, ал сымның спираль қадамы түтіктің қабырғасының қалыңдығынан басым келеді. Сәйкесінше екінші электрод болса, цилиндр кейіптес шыны түтіктің ішінде бір осьте орналасқан. Мұндай озонатор қалыпты жұмыс істеуі үшін тәжіленетін сымның спираль қадамы диэлектрлік кедергінің қалыңдығынан үлкен болуы тиіс. Сонымен қатар, сыртқы электродпен тәжілі сым арасында жұмысшы кернеуден тыс, тиюші кернеудің болуын ($U \geq 10$ кВ/мм) қамтамасыз етуіміз қажет. Ұзындығы 150 мм шыныдан диэлектрлік цилиндр тәріздес орындалған озонатор моделі жасалынды. Жасалған озонатордың диэлектрлік цилиндріне диаметрі 0,3 мм және орам қадамы 3 мм тәжіленуші сым оралған цилиндр қабырғасының қалыңдығы 1,5 мм, ал диаметрі 16,5 мм. Сыртқы электродтың ұзындығы 150 мм, қалыңдығы 0,5 мм металл цилиндр, ол шыны түтіктің ішінде, оған осьтес орналасқан.

Озонның өнімділігін көтеруге арналған басқа да инженерлік конструкцияда озонатор жасалды (3.1 в - сурет). Жалпы озонатордың көлемі 1000x150 мм. Озонатордағы оң полюсті электродтың диаметрі $d = 6$ мм ал теріс полюсті тәжіленуші электродтың диаметрі $d = 0,1$ мм - ге тең. Бұл озонатордың

номиналды режимдегі жұмысшы кернеуі 12 кВ, ал тоқ күші 5 мА, ал озонның өнімділігі сағатына 1 г - ға теңелді. Ал озонатордың негізгі кемшілігі ол өнімділіктің төменділігі мен жұмыс барысында энергия шығындардың көп болу себебінен экономикалық тиімділік едәуір төмендеуде. Осы кемшіліктен арылу үшін, озондаушы элементтің басқа конструкциясы жасалды (3.1 д және е - сурет) тәжіленуші электрод тор тәрізді, д) бір сатылы, е) екі сатылы, онда тәжілі электрод қатаң бекітілген және ауа үрленгенде разряд аумағында ламинарлы ағын пайда болады. Ұсынылған озондаушы элементтің сыртқы электродының көлемі 250x500 мм параллель екі жұқа металл темір пластинадан және екі пластина ортасында диаметрі $d = 0.1$ мм - ге тең нихромды материалдан жасалған бірнеше тәжіленуші электродтар орналасқан. Тәжіленуші электрод пен пластина арасы $h = 20$ мм, олар өзара меншікті кедергісі жоғары көлемі 20 x 350 мм текстолит материалмен оқшауланған. Озонатордың жалпы жұмыс істеу қағидасы мынадай: теріс полюсті тәжіленуші электродқа генератордан жоғары кернеудің теріс жартылай толқыны жіберіледі, осыған байланысты параллель екі жұқа металл темір пластина арасында тәжі - разряд пайда болады, ол разряд озонның түзілуіне себеп болады. Тәжірибелік жұмыстарда көрсетілгендей бұл озонатордың меншікті энергошығыны шағын (66,42 г/кВт·сағ) және басқа озонаторларға қарағанда озонның өнімділігі әжептәуір жоғары болып келеді (2г/сағ). Бұл озонатор ұзақ мерзімде жұмыс істеумен қатар, конструкциясы қарапайым және жұмыста сенімді екені тәжірибе барысында байқалды.

Тәжірибелік жұмыстарды өткізу шаралары нәтижесінде озонатордың тағы бір түрі қарастырылды. Бұл озонатордың тұрығы цилиндр тәрізді диаметрі 63 мм ал ұзындығы 1000 мм - ге тең пластмасса түтіктен шағын аспап түрінде жасалды. Түтіктің ішінде геометриялық тепе-теңдік өлшеммен тәжіленуші оң және теріс полюсті электродтар орнатылған. Озонатордың номиналды режимдегі жұмысшы кернеуі 21,7 кВ, ал тоқ күші 50 мА, ал озонның өнімділігі сағатына 10 г - ға теңелді.

Зерттеу жұмыстарының нәтижесінде әр түрлі инженерлік конструкцияда озонаторлар қарастырылып, олардың ішінен өнімділігі жоғары деңгейде табылған 3.1 г - суретте көрсетілген озонаторды қолданып, жаңа үлгідегі лас суларды тазартатын электрлі тәжі - разрядқа негізделген озонатор қондырғысы жасалды.

3.1 - суретте жазық - параллельді озон генерациялау жүйелерін жобалау нұсқалары тәжі разряд типті электродтар: а) тұтас жазықтық - параллель электродтармен; б) секциялы электродпен.

Қатты жоғары кедергілі электродтар (3.2 суреттегі а – жағдайында көрсетілген) графит пен қара көміртекке негізделген қоспадан жасалған. Қосымша резисторлардың активті кедергісі 103 - 104 Ом. (3.2 суреттегі б – жағдайында көрсетілген)



а)



б)



в)



г)



д)



е)

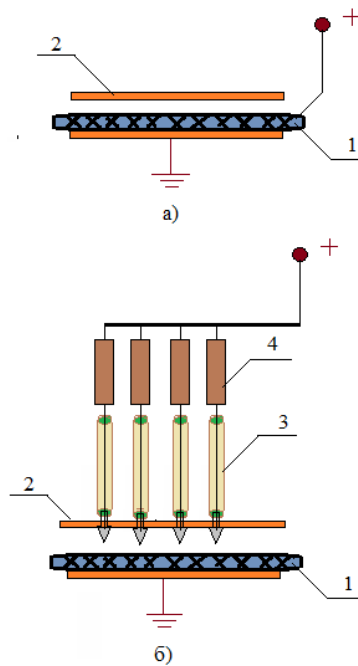


ж)



з)

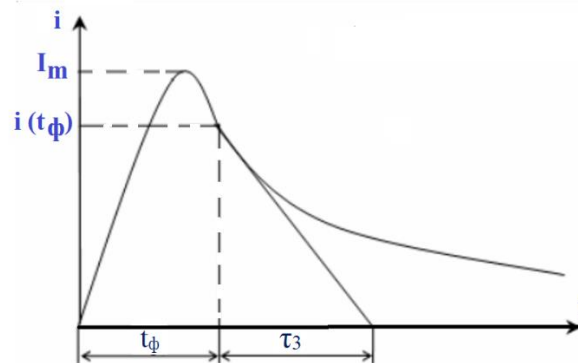
Сурет 3.1 – Электрлік тәжі разрядқа негізделіп жасалған озонаторлардың әр түрлі конструкциялары (озонаторлардың жалпы бейнесі)



Мұндағы: 1 – тор көзден жасалған электрод; 2 – корпус (нержавеика); 3 – тәжі электрод; 4 – қосымша кедергі.

Сурет 3.2 – Жазық - параллельді озон генерациялау жүйелерін жобалау нұсқасы

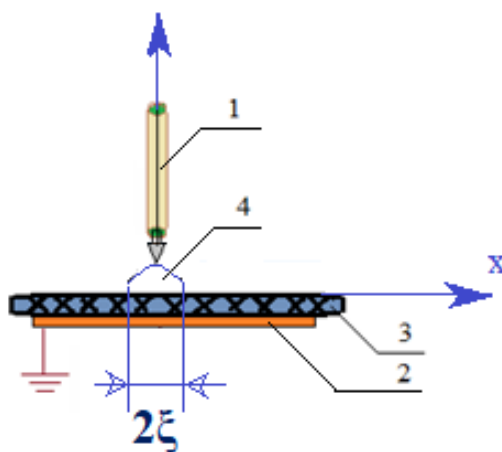
Жоғары кернеу көзіне озонаторды қосқан кезде электродтар арасында микроразрядтар пайда болады. Озонның электросинтез үрдісін сипаттап, математикалық модельдерді құрған кезде микроразрядтар физикалық негіз болып табылады. Әрбір микроразряд екі кезеңінен тұрады (3.3 - сурет).



Мұндағы: t_ϕ – микроразряд аймақтарындағы иондардың түзілу уақыты; I_m – микроразряд кезіндегі максималды ток; $i(t_\phi)$ – екінші кезеңінің басталу уақытындағы микроразряд тогы; τ_3 – микроразрядтың екінші кезеңінің аяқталуындағы уақыт тұрақтысы.

Сурет 3.3 – Микроразрядтық токтың сипаттамалық түрі

3.3 - суретте микроразрядтық токтың сипаттамалық формасы көрсетілген. Ол белгілі теориялық және эксперименттік нәтижелерден алынған. Микроразрядтың бірінші кезеңі токтың ұлғаюымен сипатталады және сәйкес келеді. Микроразрядтың иондалған аймағында ток өсуі мүмкін, оны электронды көшкіндердің өсуімен түсіндіруге болады. Микроразрядтық токтың біршама баяу ыдырауы және демпферлік бар экспоненциалды таңбасын екінші кезеңде сипатталады. Тәжілік микроразрядтың бірінші кезеңін (түзілуін) сипаттау жоғары кедергі электродтары бар озон генерациялау жүйелері пайдаланылады. Электрлік эквивалентті тізбекке негізделген математикалық модель бір өлшемді кеңістікте қарастырылғанда олардың бөлінген параметрлер бар (3.4 - сурет) [91].

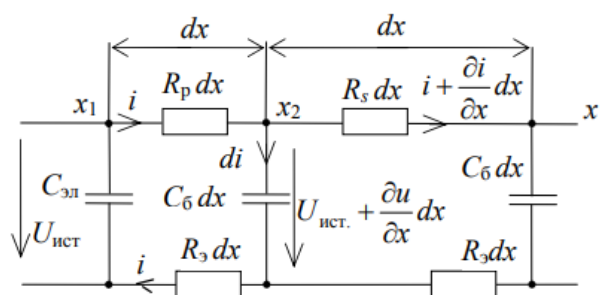


Мұндағы: 1 – тәжі электрод; 2 – корпус (нержавеика); 3 – тор көзден жасалған электрод; 4 – қосымша кедергі.

Сурет 3.4 – Кедергі бетіндегі микроразрядының бір өлшемді бейнесі.

Қашықтық $x = 0$ кезінде тәжі электрод (1) пен қосымша кедергінің (4) қосылуына сәйкес келеді. Электр разрядының дамуы жазықтықтың $x \in [0, \xi]$ аймағында басым болады. Мұндай микроразрядтың иондалған аймағының таралуы симметриялы болады. Сол сияқты бірдей бір электродқа қатысты бөгет беті бойымен таралады. Сондықтан модельдеуді тосқауылдың даму бағыттарының бірінде яғни эквивалентті схемаға сәйкес микроразрядқа негіздеп құрамыз (3.5 - сурет).

3.5 - суретте схемалық түрде берілген математикалық модель, кедергінің үлестірілген параметрлері бар математикалық модельге ұқсас болып келеді. Ол мына [90, 91] ғылыми зерттеу жұмыстарында осыған дейін қарастырылған. Таратылған параметрлері бар математикалық модельдің ерекшелігі бұл ғылыми зерттеу жұмысында қарастырылған. Онда негізгі ерекшелік қосымша кедергі (R_3) арасындағы тәжі разряды болып табылады.

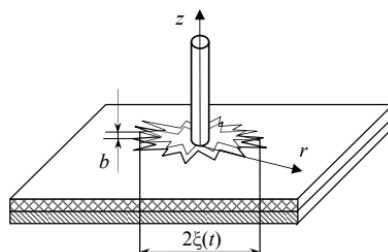


Сурет 3.5 – Тосқауыл микроразрядтың таратылған параметрлері бар эквивалентті схемасындағы жоғары төзімді электродтар

мұндағы $U_{ист.}$ - электродтар арасындағы бастапқы кернеу (В); $C_{эл}$ – электродтар арасындағы сыйымдылық (Ф/м); i – тосқауыл бетінің бірлік енінен өтетін микроразряд әсерінен пайда болған ток (А/м); C_b – диэлектрлік бөгеттің аудан бірлігіне шаққандағы сыйымдылық, (Ф/м²); R_p – арнайы микроразрядтың беттік кедергісі (Ом); R_s – диэлектрлік беттің меншікті кедергісі (Ом); $R_э$ - жоғары электродтың меншікті беттік кедергісі (Ом); x – электрод шекарасындағы разряд бағытында өлшенетін координат және беттік кедергі микроразряды (м).

Эквивалентті схема ретінде берілген 3.5 - суретте бөгет бетінің микроразрядының математикалық модель сипатталған. Берілген уақыты үшін (t) және $t + dt$ уақыты, $x = \xi$ шекарасы, $\xi = x_1$ нүктесінен $\xi = x_2 = x_1 + dx$ нүктесіне қарай жылжиды [92].

Ғылыми зерттеу жұмысында цилиндрлі екі өлшемді жүйе қарастырылады (электр разряды пайда болатын симметриялы жүйе) (3.6 - сурет).

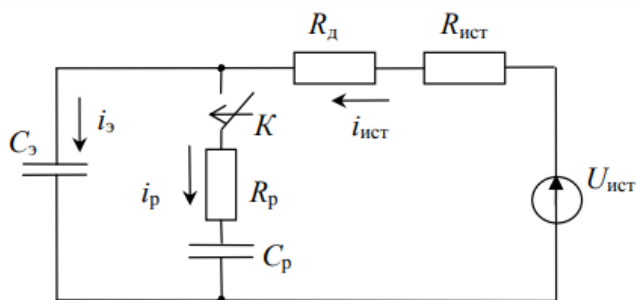


Сурет 3.6 – Екі өлшемді осьтік симметриялы кедергі бетінің разряды

r_e радиусы бар жұқа цилиндрлік электрод диэлектрлік тосқауылдың бетмен жанасады. Электродтық жүйені қосқаннан кейін кернеу астында және электр өрісінің шекті кернеулігіне E_0 жету тұсында цилиндрлік электродтың $r_e < r < \xi$ аймағында иондалу күшті болады.

Тәждің жақын разряды орташа мәнмен дамиды иондалған аймақтың қалыңдығы b (3.6 - сурет). Осыған дейін қарастырылған кейбір ғылыми зерттеу жұмыстарының қосымша нәтижелері келтірілген [93]. Осындай зерттеу жұмыстарына сүйеніп, математикалық модельді қарастыру кезінде цилиндрлік электродты тізбекте қосымша белсенді кедергінің болуы сипатталады.

Ғылыми зерттеу жұмысында сонымен қатар негізделген математикалық модель қолданылады. Параметрлері бар электрлік эквивалентті тізбек микроразрядтың екінші (соңғы) кезеңінің сипаттамасы (3.7 - сурет) көрсетілген. Мұндай кедергі аймағында микроразряд, яғни $C_{mk} = \text{const}$. 3.7 - суреттегі сұлбадағы К кілті өткелдегі микроразряд модельінің негізгі шешуші кезеңі. $U_{ист}$ кернеуі жеке микроразряд үрдісінде тұрақты қабылданады. Разряд синусоидалы көзден қуат алған кезде немесе қоректендіру кернеуінің өзгеру жылдамдығымен импульстік кернеу жоқ 0,1 - 1 кВ/мкс тәртібінен жоғары, микроразрядтың қызмет ету мерзімі (ондаған наносекунд) кернеудің өзгеру жылдамдығынан әлдеқайда аз.



Мұндағы $C_э$ – электродаралық сыйымдылық (Ф); $U_{ист}$ – тұрақты кернеу көзі (В); $R_{ист}$ – көздің кедергісі (Ом); $R_д$ - қосымша кедергі (Ом); R_p - микроразрядтағы активті кедергі (Ом); C_p – микроразрядтық сыйымдылық (Ф).

Сурет 3.7 – Микроразрядтың соңғы сатысының электрлік эквиваленттік тізбегі

Бұл ғылыми зерттеу жұмысындағы математикалық модельдеу объектісі болып кедергісі жоғары электродтары бар озон генерациялау жүйелеріндегі микроразряд үрдісі табылады. Сонымен қатар кедергі түрі, ол жеңілдететін жорамалдар жоқтығы болып табылады. Микроразрядтардың бір-біріне әсер етуін есепке алмағанда, индуктивті параметрлер басқа микроразряд кедергісіне сызықты еместігін байқауға болады.

3.2 Жазық - симметриялық координаталар жүйесіндегі таратылған параметрлердің математикалық моделі

Кейбір ғылыми зерттеу жұмыстарында [90,91] тосқауыл микроразрядының математикалық моделі таратылған параметрлі электрлік сұлбасында көрсетілген. Сонымен бірге тосқауылдағы озон генерациялау жүйелері жоғары өткізгіш электродтарда активті кедергі жоқтығын ескереді. Ұсынылып отырылған ғылыми зерттеу жұмысында электродтардың активті кедергісін ескереді. Яғни озон генерациялау жүйелері және 3.5 – суреттегі электрлік сұлба үшін негізгі теңдеулерді былай анықтауға болады:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} + (R_p + R_э) \cdot i(x,t) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - (R_p + R_3)C_6 \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

мұндағы $U(x,t)$ – кез келген t уақытындағы кедергідегі құлау кернеуінің таралуы.

Парабалдық типті теңдеулер (3.2) әдетте жылу өткізгіштік және диффузия үрдістерін сипаттау [92], электр энергиясын беру үшін қарастырылады [89,94]. Газ разрядындағы көшкіннің иондану үрдісін сипаттау фазалық ауысу есебінің [92] тұжырымы ең қолайлы болып табылады. Онда заттың физикалық күйінде өзгеріс бар. Біздің жағдайда, төмен температуралы плазманың иондалған күйі разряд және иондау кезінде газ әлсіз иондалған күйге өтеді. Математикалық физикада фазалық ауысу мәселесі зат температурасының өзгерісімен байланысты. Электр разрядының дамуымен фазаның жағдайы әлсіз иондалған күйден плазмалық күйге өту арқылы анықталады. Разряд аймағындағы электр өрісі кернеулігінің шекті мәні E_0 , разряд аймағындағы иондану әсерінен айтарлықтай күшейеді.

Беткі тосқауыл разрядының дамуы кезінде үш разрядтың даму қарқындылығының дәрежесі артады [95].

Тәжі разряды электр өрісі аймағында кернеуліктің әсерінен ақырындап өсіп, ең үлкен кернеу аймағында пайда болады. Оның көшкінді электрондардың дрейфтік жылдамдығы $v=10^5$ м/с. Кернеудің жоғарылауымен мәні $N/n_0 > 10^8$, тәж разрядының көшкін механизмі өтеді. Оның стример ұзарту жылдамдығы $v=10^6$ м/с жылдамдыққа тең. Разрядтың дамуы көздің жеткілікті энергиясы әсерінен болады. Содан кейін кернеудің әсерінен ұлғайып, жетекші механизмі бар сырғымалы разрядтар пайда болады. Разряд өте тез жылдамдықпен дамыды шамамен $10^4 - 10^5$ м/с [95,96].

Бұл математикалық модельде тосқауылдың аймағында орналасқан ауадағы разрядтың ауысуы, әлсіз иондалған күйден жоғарғы иондалған күйдегі плазмаға ұқсас үрдісті қарастырады. Өтпелі шарт бойынша электр өрісінің кернеулігінің деңгейіне жету, ауа ионизациясының басталуының шекті қарқындылығына сәйкес $E_0 = 24,5$ кВ/см [97]. Кейбір ғылыми зерттеу жұмыстарында [90,91] фазалық ауысу мәселесінің шешімін бөгеттік беттік разрядты дамытуға қолданылатындай қарастырады. Озонды өңдеу жүйелерінің жоғары кедергілі электродтарының кедергісін теориялық есептемелер жүргізу кезінде олардың тапсырмалары келесідей болады:

$$u_1(x,t) = A_1 + B_1 \cdot \Phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right), \text{ кВ}, \quad (3.3)$$

мұндағы $U_1(x,t)$ - кедергі бетіндегі кернеудің таралуы иондалған аймақ. A_1 және B_1 - шекаралық шарттардан анықталған тұрақтылар [90, 91],

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \quad (3.4)$$

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{(R_p + R_э) C_б}} \quad (3.5)$$

$x = \xi$ кезінде иондану шекарасындағы шарт:

$$U_{\text{қорек.}} + B_1 \cdot \Phi\left(\frac{\xi}{2a_1\sqrt{t}}\right) = u_1(\xi, t) \quad (3.6)$$

(3.6) формула микроразряд шекарасы қозғалған кезде жарамды (ионизация) белгілі заңдылық бойынша:

$$\xi = \psi\sqrt{t}, \text{ м}, \quad (3.7)$$

мұндағы ψ - кейбір тұрақтылық, м/с^{1/2}; t – беттік микроразрядтың басталу уақыт моменті, с.

Белгілеуді енгізейік:

$$\psi/2a_1 = \beta \quad (3.8)$$

Микроразряд аймағындағы кедергі бетіндегі кернеудің таралуы мына формуламен анықталады:

$$u_1(x, t) = U_{\text{ист.}} - \frac{U_{\text{қорек.}}}{\Phi(\beta)} \cdot \Phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right), \quad x \leq \xi. \quad (3.9)$$

(3.10) формуланы x -қа қатысты дифференциалдау үшін теңдеу аламыз, ол микроразряд аймағындағы электр өрісінің кернеулігі:

$$E_1(x, t) = -\frac{U_{\text{қорек.}}}{\sqrt{\pi}a_1\sqrt{t}\Phi(\beta)} \exp\left[-\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right)^2\right], \text{ В/м}. \quad (3.10)$$

Иондану шекарасындағы электр өрісінің кернеулігінің мәні $x = \xi$ және $t = t_\phi$ мына формуламен анықталуы мүмкін:

$$|E_1(\xi, t_\phi)| = \frac{U_{\text{қорек.}}}{\sqrt{\pi}a_1\sqrt{t_\phi}\Phi(\beta)} \exp(-\beta^2) = E_0, \text{ В/м}, \quad (3.11)$$

мұндағы t_ϕ – микроразрядтың түзілу уақыты, с. $E_0 = 2,45 \cdot 10^6$ В/м - ауа ионизациясының басталуының шекті қарқындылығы.

[90,91] жұмыстарда $\beta(t_\phi) = 1/\sqrt{2}$ шамасында есептелді. Осы (3.11), (3.5) формулаларды ескере отырып, уақытты анықтауға арналған өрнекті аламыз. Яғни қорек көзінің кернеуіне байланысты микроразрядтың түзілуі:

$$t_\phi = \frac{U_{\text{қорек.}}^2}{E_0^2} \cdot \frac{\exp(-2\beta^2)}{\pi\Phi^2(\beta)} (R_p + R_э)C_б = 0,25 \left(\frac{U_{\text{қорек.}}}{E_p}\right)^2 (R_p + R_э)C_б \quad (3.12)$$

(3.7) және (3.8) өрнектерін ескере отырып, (3.12) теңдеуден шығарамыз. Яғни иондану шекарасының орнын анықтау формуласы:

$$\xi = \frac{U_{\text{корек.}}}{E_0} \cdot \frac{\exp(-\beta^2)}{\sqrt{\pi}\Phi(\beta)} \cdot 2\beta = \frac{U_{\text{корек.}}}{\sqrt{2}E_0}, \text{ м.} \quad (3.13)$$

(3.13) формуладан бірінші жуықтауда геометриялық шешім екенін көруге болады. Яғни микроразряд электродтардың кедергісіне және қалыптасу уақытына байланысты емес. (3.12) формула бойынша, жоғары электродтардың кедергісіне байланысты R_3 .

Жоғары электродтың кедергісінің мәндері және микроразряд ұзындығына байланысты микроразрядтық токқа сапалық баға берейік. Себебі мұндай микроразряд тогы жайлы деректер жоғарыда айтылған [91] жұмыстарда зерттеулер жүргізбеген.

Барлық бағыттағы микроразрядтардың дамуының симметриясын ескере отырып инелі электрод, беттік микроразрядтың жалпы тогы жақын электрод аймағын жуық формуламен анықтауға болады:

$$I(0, t) = 2i(0, t)b_p = -2 \frac{E_1(0, t)}{R_p + R_3} b_p, \text{ А.} \quad (3.14)$$

мұндағы b_p – разряд аймағының ені, м.

Электрод шекарасындағы электр өрісінің кернеулігі, В/м.

$$E_1(0, t) = - \frac{U_{\text{корек.}}}{\sqrt{\pi}a_1\sqrt{t}\Phi(\beta)} \quad (3.15)$$

(3.14) формуладағы «2» коэффициенті біріншісінде болатынына байланысты жуықтау, нақты осьтік симметриялы микроразряд ретінде қарастыруға болады (екі жақты жазық симметриялы 3.3 - суретте келтірілген) және оның ені микроразрядты ине электрод үшін $b_p = 2\xi = 2\psi \sqrt{t}$ тең етіп қабылдауға болады. Микроразрядтың ұзындығы кезіндегі токтың максималды $x = \xi$ ($\beta=1/\sqrt{2}$) мәніне жетеді, оны мына формуламен анықтауға болады:

$$I_m = 3,3U_{\text{корек.}} a_1 C_6 \beta \cdot 2a_1 \approx 4,7 \frac{U_{\text{корек.}}}{R_p + R_3}. \quad (3.16)$$

(3.16) өрнекке сәйкес микроразряд түзілу үрдісінде ток өзгеріссіз қалады. Нақты жағдайларда микроразрядтағы ток нөлден максималды мәнге дейін өседі. Бұл индуктивті және беттік кедергісі бар тізбекте микроразрядтың болуымен түсіндіріледі. Ондағы меншікті беттік кедергінің шектік мәні $\rho_s = 10^9$ Ом. Ол разряд аймағындағы беттің меншікті кедергісінің мәніне дейін $\rho_s = 10^4$ Ом өседі. Жоғары электрод кедергісін қолданудың оң әсерін көрсету электродтардың кедергісі R_3 сәйкес және микроразряд бетінің кедергісі $R_p \approx 10^4$ Ом болуы керек.

Алдағы уақытта теориялық есептеулері үшін мынаны қабылдаймыз: $R_э \approx R_p = 10^4$ Ом. Содан кейін кернеуі 10 кВ жоғары кедергілі электродтар үшін келесі нәтижелерді аламыз:

- микроразряд ұзындығы

$$\xi = \frac{U_{\text{корек.}}}{\sqrt{2}E_0} = \frac{10^4}{\sqrt{2} \cdot 2,45 \cdot 10^6} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad (3.17)$$

- параметр мәні

$$\psi = 2a_1\beta = \frac{2\beta}{\sqrt{(R_p + R_э)C_6}}, \quad (3.18)$$

мұндағы диэлектрлік кедергінің меншікті сыйымдылығын, Φ/m^2 былай есептеуге болады. $C_6 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d}$.

d – диэлектрлік тосқауылдың қалыңдығы, м.

Озонатордың диэлектрлік тосқауылының параметрлерінің мәндерін алайық $\varepsilon = 3,5$, $d = 10^{-3}$ м, онда $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/м}^2$, $\psi \approx 50$;

(38) формула бойынша микроразрядтың түзілу уақыты:

$$t_\phi = (\xi/\psi)^2 \approx 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ с}. \quad (3.19)$$

$$r_{\text{микр}} + r_{\text{внос}} = \frac{U_{\text{корек.}}}{I_m} = \frac{1}{4,7} (R_p + R_э), \quad (3.20)$$

мұндағы $r_{\text{микр}} = R_p / 4,7 = 2100$ Ом - микроразрядтық кедергінің тиімділігі, $r_{\text{внос}} = R_э / 4,7 = 2100$ Ом – жоғары төзімді электродтың тиімділігі.

Микроразряд осьтік симметрияға ие болғандықтан, дәлірек болу үшін микроразряд тогы өтетін ені b_p ретінде есептеу, электронды көшкіннің (стримердің) шеңберін алу керек. Ол микроразряд үрдісінің бастамасы болып табылады:

$$\xi_0 = 2\pi r_0, \quad (3.21)$$

мұндағы $r_0 \approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ м – электронды көшкіннің немесе стримердің радиусы [98].

(3.14) формуладан бір микроразряд тогының максималды мәні (3.12), (3.15) және (3.21) ескере отырып («2» коэффициентінсіз) мына өрнекті алуға болады:

$$I_m = 1,65 \frac{E_0 2\pi r_0}{R_p + R_э} \approx 10,4 \frac{E_0 r_0}{R_p + R_э}. \quad (3.22)$$

Егер $R_3 = 0$, $R_p = 10^4$ Ом болса онда $I_m = 1,27$ А және егер $R_3 = R_p = 10^4$ Ом онда $I_m = 0,64$ А, бұл белгілі эксперименттік мәліметтерге жақын, мұндағы $0,1 \text{ А} < I_m < 1 \text{ А}$.

Микроразрядта пайда болатын минималды кернеу:

$$U_{min} = I_m r_{\text{микр}} = 0,64 \cdot 2100 \approx 1,35 \text{ кВ} \quad (3.23)$$

Синусоидалы қорек көзінің жұмыс кернеуі мынаған тең:

$$U_{\text{қорек.}} = 1,35/\sqrt{2} = 0,96 \text{ кВ} \quad (3.24)$$

Микроразрядтың осьтік тосқауылға жақын аймағының диаметрін есептейік (симметрия).

$t = t_\phi$ үшін:

$$d_6(t_\phi) = 2(r_3 + \xi) = 2\left(r_3 + \frac{U_{\text{қорек.}}}{\sqrt{2}E_0}\right), \quad (3.25)$$

мұндағы r_3 – ине электродының радиусы. Осы кезде $U_{\text{ист.}} = 10$ кВ, $r_3 = 0,5$ мм: $d_6(t_\phi) = 6,8$ мм.

Микроразрядтың жақын тосқауыл аймағының диаметрін дәлірек бағалау, осьтік симметриясы бар, математикалық қарастыру кезінде одан әрі жүзеге асырылады. Жоғары кедергісі бар бөгеттік разрядтағы озон өңдеу жүйесінің үлгілері цилиндрлік координаттар жүйесіндегі электродтарға ұқсас.

Микроразрядтың екінші, соңғы сатысында тосқауыл аймағында қайта зарядтау орын алады.

Микроразрядтың бұл бөлігінің геометриясы қазірдің өзінде қалыптасқан және сыйымдылығы өзгермейді. Тиісінше, қайта зарядтау белгілі бір уақыт тұрақты τ кезінде экспоненциалды түрде жүреді деп болжауға болады. τ анықтау үшін электр зарядтары арасындағы байланысты табамыз, ол үшін микроразрядтың тосқауылға жақын аймағына қалыптастыру және қайта жүктеу жеткізіледі.

Кернеудің таралуын пайдалану разрядтың тосқауыл аймағына жақын (3.9), (3.7) және (3.5) өрнектерді ескере отырып табамыз:

$$u_1(x, t) = U_{\text{қорек.}} \cdot \left[1 - \Phi\left(\beta \frac{x}{\xi}\right) / \Phi(\beta)\right] \quad (3.26)$$

Микроразрядтың түзілуі және оның аяқталуы кезіндегі зарядтардың қатынасы $k = q_{\text{форм}} / q_{\text{зав}}$ (мұндағы $q_{\text{форм.}}$ – қалыптастыру; $q_{\text{зав.}}$ – аяқтау) пішіндері сәйкесінше мынаған тең болады:

$$k = \frac{\int_0^1 [1 - \Phi(\beta \frac{x}{\xi}) / \Phi(\beta)] d\frac{x}{\xi}}{\int_0^1 [\Phi(\beta \frac{x}{\xi}) / \Phi(\beta)] d\frac{x}{\xi}}. \quad (3.27)$$

Мұнда бөлімін анықтау жеткілікті:

$$\int_0^1 \left[\Phi \left(\beta \frac{x}{\xi} \right) / \Phi(\beta) \right] d \frac{x}{\xi} = \frac{1}{\Phi(\beta) \cdot \beta} \cdot \left[\Phi(\beta) \cdot \beta + \frac{e^{-\beta^2} - 1}{\sqrt{\pi}} \right] = 1 - \frac{1 - e^{-\beta^2}}{\sqrt{\pi} \cdot \beta \cdot \Phi(\beta)} \quad (3.28)$$

$\beta = 1/\sqrt{2} = 0,71$ үшін:

$$\int_0^1 \left[\Phi \left(\beta \frac{x}{\xi} \right) / \Phi(\beta) \right] d \frac{x}{\xi} = 0,53. \quad (3.29)$$

Соңында алатынымыз:

$$k = \frac{q_{\text{форм}}}{q_{\text{зав}}} = 0,887 \quad (3.30)$$

«к» зарядтарының арақатынасын анықтау кезінде кернеуді (3.2), бөлу қолданылды. R_p - разряд аймағының меншікті кедергісі және сәйкесінше, оның даму үрдісіндегі тұрақты микроразрядтық лездік болжаммен алынған ток. Сонда мұны былай өрнектеуге болады:

$$q_{\text{форм}} = I_m \cdot t_p \quad (3.31)$$

(3.31) орнына (3.12) және (3.22) қойып, мынаны аламыз:

$$q_{\text{форм}} = 2,5 \frac{U_{\text{кореk.}r_0}^2}{E_p} C_6 \quad (3.32)$$

Максималды микроразряд тоғы сызықтық заңдылыққа жақын. Себебі микроразряд аймағында ток максимумға жетеді. Оны қалыптасу үрдісіндегі нақты заряд деп болжауға болады:

$$q_{\text{форм}} \geq \frac{1}{2} q_{\text{форм}} = 1,25 \frac{U_{\text{кореk.}r_0}^2}{E_0} C_6. \quad (3.33)$$

Микроразрядтың соңғы сатысы үшін заряд мына формуламен анықталады:

$$q_{\text{зав}} = \frac{q_{\text{форм}}}{k} = \frac{2,5 U_{\text{кореk.}r_0}^2 C_6}{k E_0}. \quad (3.34)$$

Өрнек үшін $U_{\text{ист.}} = 10$ кВ, $r_0 = 0,5$ мм, $E_0 = 2,45$ кВ/мм, $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8}$ Ф/м²:

$$8 \cdot 10^{-10} \text{ Кл} < q'_{\text{форм}} < 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл};$$

$$q_{\text{зав}} = \frac{q_{\text{форм}}}{k} = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

Микроразрядтың жалпы заряды мынаған тең болады:

$$q = q'_{\text{форм}} + q_{\text{зав}} \quad (3.35)$$

Сандық жағынан бары $2,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} < q < 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$.

Бұл параметрлер белгілі деректермен жақсы сәйкес келеді (1.5 - кесте). Бірінші жуықталған микроразряд сыйымдылығын тұрақты деп есептесек онда қалыптастыру үрдісі ($C_{\text{микро}} = \text{const}$) бойынша кернеу қатынасын аламыз. Түзілу кезеңінің соңында микроразрядтың сыйымдылығы қолданылады ($U_{\text{Смикро}}$). Мұнда бастапқы қорек көзінің кернеуі ($U_{\text{қорек}}$), алғашқы сатыда тасымалданатын зарядтың қатынасына тең. Микроразряд арқылы қалыптасқан тасымалданатын толық зарядты ескере отырып, (61) өрнек қатынасы мынаған тең болады:

$$\frac{U_{\text{С микро}}}{U_{\text{ист}}} = \frac{q'_{\text{форм}}}{q'_{\text{форм}} + q_{\text{зав}}} = \frac{q'_{\text{форм}}}{q'_{\text{форм}} + \frac{q'_{\text{форм}}}{k}} = \frac{k}{k+1} = \frac{0,887}{0,887+1} = 0,47 \quad (3.36)$$

Микроразрядты аяқтау сатысында кедергіге жақын бөліктің сыйымдылығы тұрақты сақталады. Сондықтан осыған дейін анықталғандай, бірінші жуықтауда микроразрядтың тосқауылға жақын аймағының соңғы зарядтау үрдісін қарастыруға болады конденсатордағы заряд сияқты. Заряд тогы уақыт тұрақтысы τ бойынша кейбір кездерде экспоненциалды түрде ыдырайды. Сонда бұл мынадай болады:

$$I'_m \tau = q_{\text{зав}} \quad (3.37)$$

$$I'_m = \frac{U_{\text{қорек}} - U_{\text{С микро}}}{r_{\text{микро}}} = I_m \frac{1}{1+k} = 1,5 \frac{1}{1+0,887} \quad (3.38)$$

мұндағы $U_{\text{С микро}}$ – микроразрядтың бастапқы сыйымдылығына қолданылатын кернеу (соңғы кезең). Осы жерден:

$$\tau = q_{\text{зав}} / I'_m \quad (3.39)$$

$q_{\text{зав}} = 1,8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ және $I'_m = 0,64 \text{ А}$ үшін сандық мәндерді қолданып, $\tau = 2,8 \text{ нс}$ шамасын анықтауға болады. Екінші жағынан, жалпы зарядты сыйымдылықтан табуға болады (микроразрядтың тосқауыл бөлігі арқылы):

$$C_{\text{микро}} = C_0 S_{\text{микро}} \quad (3.40)$$

мұндағы $S_{\text{микро}}$ микроразрядтың кедергіге жақын бөлігінің ауданы болуы мүмкін, оны мына формула бойынша анықтауға болады:

$$S_{\text{микро}} = \pi r_0^2 + 2\pi r_0 \xi = \pi r_0 (r_0 + 2\xi) \approx 2\pi r_0 \xi \quad (3.41)$$

Иондану шекарасы үшін (3.13) өрнекті ескере отырып, мынаны алуға болады:

$$S_{\text{микр}} = 1,4\pi r_0 \frac{U_{\text{ист.}}}{E_0}, \quad (3.42)$$

$$C_{\text{микр}} = 1,4\pi r_0 \frac{U_{\text{ист.}}}{E_0} C_6. \quad (3.43)$$

$q = U_{\text{ист.}} C_{\text{микр}}$. заряд осы жағдайда болғанда келесі өрнекті аламыз:

$$q = \pi r_0 \left(r_0 + 1,4 \frac{U_{\text{ист.}}}{E_0} \right) U_{\text{ист.}} C_6 = 1,4\pi r_0 \frac{U_{\text{ист.}}^2}{E_0} C_6. \quad (3.44)$$

Мұндағы $U_{\text{корек.}} = 10$ кВ, $r_0 = 0,5$ мм, $E_0 = 24,5$ кВ/см, $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8}$ Ф/м² онда $q = 2,7 \cdot 10^{-9}$ Кл, бұл алдыңғы нәтижемен жақсы сәйкес келеді, ол (66) формуласы арқылы анықталады. Микроразряд энергиясы үшін оны былай өрнектеуге болады:

$$W_{\text{микр}} = W_6 + W_{\text{акт}} \quad (3.45)$$

мұндағы $W_6 = q U/2$ - кедергіге жақын бөлікте жинақталған микроразрядтың реактивті энергиясы;

$W_{\text{акт}}$ – кедергіге жақын бөлікті зарядтауға жұмсалған микроразрядтың активті энергиясы.

Егер микроразрядтың тосқауылға жақын бөлігінде нөлден зарядталғанын қабылдайтын болсақ микроразрядтың жану кернеуін « U » ескеретін болсақ, онда:

$$W_{\text{акт}} = W_6 = q U/2 \quad (3.46)$$

(3.44) ескере отырып, мынаны алуға болады:

$$W_{\text{акт}} = W_6 = 0,7\pi r_0 \frac{U^3}{E_0} C_6 \quad (3.47)$$

Өз кезегінде энергияның белсенді бөлігі екі құрамдас бөліктен тұрады:

$$W_{\text{акт}} = W_{\text{э}} + W_{\text{дж}}, \quad (3.48)$$

мұндағы $W_{\text{э}} = U_0 \cdot q$ – электродқа жақын шығындар;

$U_0 \leq 1$ кВ негізінде қабылданатын кедергі кернеуінің төмендеуі болып табылады ең аз разрядты жану кернеуі [99].

Джоуль энергиясының жоғалуын мына формуламен анықтауға болады:

$$W_{дж} = q \cdot \left(\frac{U}{2} - U_э \right) = I_m^2 \cdot \left(t_p + \frac{1}{2} \tau \right) \cdot (r_{микр} + r_{внос}) \quad (3.49)$$

Ол үшін $U = 10$ кВ, $r_0 = 0,5$ мм, $E_0 = 24,5$ кВ/см, $C_6 \approx 3 \cdot 10^{-8}$ Ф/м²: сонда алатынымыз $W_{акт} = 1,4 \cdot 10^{-5}$ Дж; $W_э = 0,27 \cdot 10^{-5}$ Дж; $W_{дж} = 1,67 \cdot 10^{-5}$ Дж. (80) өрнектен көрініп тұрғандай, Джоуль шығындары камера ішінде өзіндік шығындарға бөлінеді.

$$W'_{дж} = I_m^2 r_{микр} \left(t_p + \frac{1}{2} \tau \right) \quad (3.50)$$

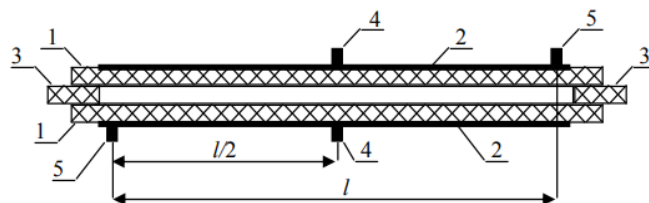
және сыртқы кедергісі жоғары электродтарда

$$W''_{дж} = I_m^2 r_{внос} \left(t_p + \frac{1}{2} \tau \right) \quad (3.51)$$

Ең көп микроразрядтық токты тағы бір рет қарастырайық энергия балансы (3.49), (3.12), (3.16) және (3.44) өрнектерді ескере отырып микроразрядты ток амплитудасын анықтаймыз:

$$I_m = 6,3 \sqrt{\frac{r_0 \left(\frac{U}{2} - U_э \right) E_p}{R_p + R_э}} \quad (3.52)$$

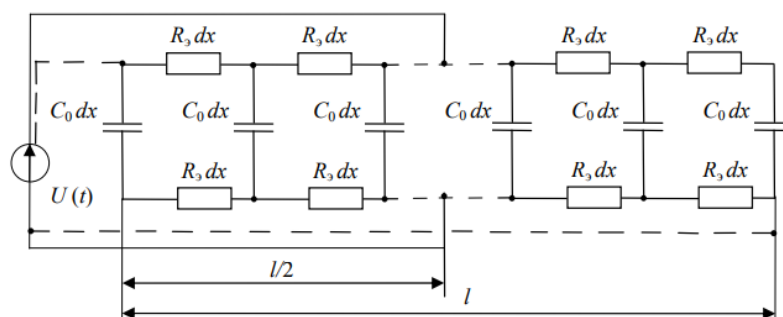
Ол үшін $U = 10$ кВ, $r_0 = 0,5$ мм, $E_0 = 24,5$ кВ/см, $R_p = R_э = 104$ Ом ескеру керек $I_m = 0,7$ А, (3.53) формула арқылы алынған алдыңғы салыстырумен жақсы сәйкес келеді. Жоғары кедергілі электродтардың болуы озон камерасындағы сыйымдылықты зарядтау үрдісін кешіктіреді. Озон генераторының қуат көзінің жиілігі неғұрлым жоғары болса, соғұрлым зарядтау үрдісі біркелкі емес. Нәтижесінде озон синтезінің тиімділігі төмендейді. Бұл құбылысты симметриялы жағдай үшін толығырақ қарастырайық. Екі тосқауыл және екі жоғары кедергісі бар разрядтық озонатор камерасының электродтары 3.8 – суретте келтірілген.



Мұндағы: 1 – бөгеттер; 2 - кедергісі жоғары электродтар; 3 - тығыздағыштар;
4 - ток өткізгіштері; 5 – ығысуы бар ток өткізгіштері

Сурет 3.8 – Екі бөгетті разряд камерасы

Есептеу үшін бөлінген параметрлері бар эквивалентті схеманы қолданамыз, 3.9 - суретте көрсетілген.



Мұндағы: $U(t)$ – қоректендіру көзі; R_3 – жоғары кедергілі электродтың меншікті беттік кедергісі; C_0 – меншікті сыйымдылық озондау камерасын шығару; l – разрядты озонатор камерасының ұзындығы

Сурет 3.9 – Таратылған параметрлері бар эквивалентті схема

Сондай - ақ қуат көзін қосудың екі нұсқасы бар: ығысусыз ток беру (сымдар тұтас сызықтарда көрсетілген) және ығысуы бар (сымдар үзік сызықпен көрсетілген). Байланысты ток өткізгіштерінің орын ауыстыруы және синусоидалы қуат көзінің айырымын салыстырайық. Үрдіс орнықты екенің байқауға болады.

Ток сымдарын ауыстырусыз қосу үшін ең төменгі кернеу кезінде озонатор камерасының ұштары [41] өрнекпен анықталады:

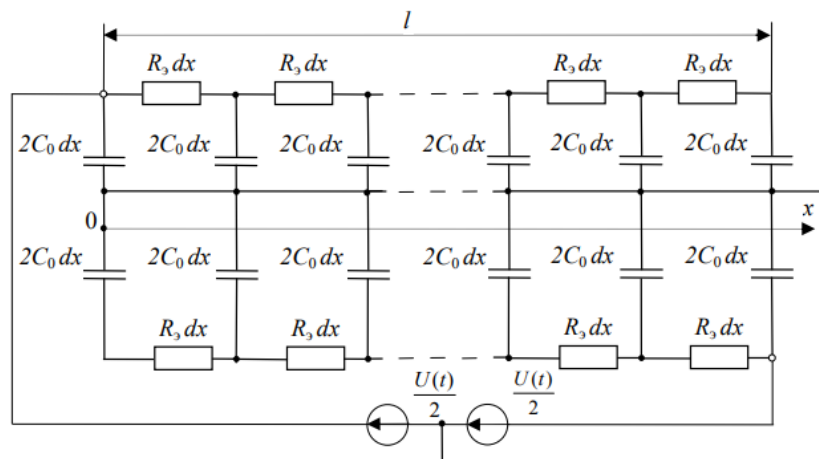
$$U_{min} = \frac{U}{ch(\gamma l/2)} \quad (3.53)$$

$$\gamma = \sqrt{4\pi f C_0 R_3} \quad (3.54)$$

мұндағы f – қуат көзінің жиілігі. Сәйкесінше, кернеудің салыстырмалы төмендеуі бар екенің байқауға болады:

$$\Delta U = \frac{U_{min}}{U} = \frac{1}{ch \gamma l/2} \quad (3.55)$$

Есептеулерді жеңілдету және әдебиет деректерін пайдалану мақсатында 3.10 - суреттегі диаграмма бірінші жуықтау есептелген түрінде ұсынылады (3.10 - сурет).



Сурет 3.10 – Ток өткізгіштерін есептеу сұлбасы

Содан кейін кассетаның ұштарында максималды кернеу анықталады келесі формула бойынша:

$$U_{\max \text{ см.}} = U \frac{ch^2 \gamma l / 2}{ch \gamma l} \quad (3.56)$$

Айнымалы ток өткізгіштері үшін салыстырмалы кернеудің төмендеуі ұқсайды:

$$\Delta U_{\text{см}} = \frac{U_{\min \text{ см.}}}{U_{\max \text{ см.}}} = \frac{1}{ch \gamma l / 2} \quad (3.57)$$

(3.58) ішінен γl мәнін табамыз:

$$\gamma l = 2 \text{Arch}(1/\Delta U) \quad (3.58)$$

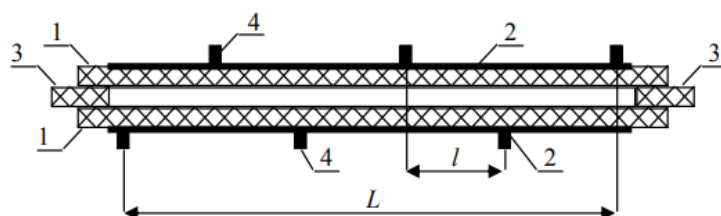
(3.53) өрнекке γ орнына қойып, қорек көздің f жиілігін шешуге болады:

$$f \leq \frac{\text{Arch}^2(1/\Delta U)}{\pi C_0 R_s l^2}. \quad (3.59)$$

Мысалы, ΔU үшін = 0,95; $R_s = 104$ Ом; $C_0 = 10^{-8}$ ф/м²; $l = 0,3$ м бізде бар $f \leq 3,5$ кГц.

Есептелген мәліметтер жоғары кедергілі электродтарды қолдануды көрсетеді озон синтезінің өнімділігін арттыру үшін негізгі шектеулер бар, ол озонаторлардың қоректендіру көздерінің жиілігін арттыру шегіне байланысты. Кернеу жиілігін белгілі бір мәннен жоғары арттырудың теріс әсері мен кедергі разрядының қарқындылығының шегі, мысалы, [100] сипатталған.

Жиілік шекарасын ұлғайту ($f_{\text{гр}}$) ток өткізгіштерінің саны арттыру арқылы жасауға және сәйкесінше олардың арасындағы қашықтықты (l) азайтуға болады. Мұндай озондау камерасының жобасы 3.10 - суретте көрсетілген.



Мұндағы: 1 - кедергілер; 2 - жоғары қарсылық электродтар; 3 - тығыздағыштар; 4 - ток өткізгіштері; 1 – ток өткізгіштері арасындағы қашықтық; L – шығару камерасы ұзындығы.

Сурет 3.11 – Алты ток өткізгіштері бар озонатор кассетасы

Минималды (1) микроразрядтың тосқауылға жақын бөлігінің диаметріне (d) байланысты $l > d$ анықталды. Есептеулер үшін біз $l = 1$ см деп аламыз. Жоғарыдағы (3.59) формуланы пайдалана отырып жиілікті былай есептеп аламыз $f_{гр} \approx 3$ МГц. Егер зарядтау үрдістерін тұрақты деп санауға болатын болса, онда разряд үрдістері қысқа мерзімді наносекундтық өтпелі сипатқа ие және ол микроразряд үрдістерімен анықталады. Бұрынғыдай, жазық симметриялы нұсқа үшін микроразряд үрдісін қарастырайық.

Талдау үшін біз эквивалентті схеманы қолданамыз, 3.5 - суретте көрсетілген дифференциалдық теңдеу (3.2) және бастапқы жағдай $U(x, 0) = U_0$ [38, 87] күшінде қалады. Шекара шарты ауыстырылады $\frac{\partial U}{\partial x}(0, t) = -E_t$ екенін ескерсек және амплитуда үшін (3.22) өрнегін қолдану арқылы микроразряд тогын былай жазамыз:

$$\frac{\partial U}{\partial x}(0, t) = -I_m \cdot \frac{(R_p + R_3)}{10r_0}. \quad (3.60)$$

Сонымен қатар, бірінші жуықтап микроразрядтық токты аламыз.

$$t_{\text{микр}} = t_p + \tau = t_p(1 + 1/k). \quad (3.61)$$

Сонымен қатар, эквивалентті тізбекте R_p нөлге тең деп қабылданады. Сонда (3.2) өрнектен дифференциалдық теңдеу мына түрді алынады:

$$\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} - R_3 C_0 \frac{\partial U(x, t)}{\partial t} = 0. \quad (3.62)$$

Жоғарыда келтірілген шарттар мен болжамдарға сүйене отырып, жоғары кедергілі электрод бойынша кернеуді бөлуге арналған белгілі мысалдарды қарастырайық [101]:

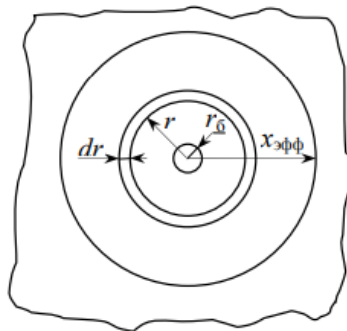
$$U(x, t) = U \cdot \Phi \left(x \cdot \sqrt{\frac{R_3 C_0}{2t}} \right) + \frac{I_m(R_3 + R_p)}{10r_0} \cdot \sqrt{\frac{2t}{\pi R_3 C_0}} \cdot \exp \left(\frac{-x^2 R_3 C_0}{2t} \right) - \frac{I_m(R_p + R_3)}{10r_0} x \cdot \left[1 - \Phi \left(x \cdot \sqrt{\frac{R_3 C_0}{2t}} \right) \right] \quad (3.63)$$

Жоғары кедергілі электрод бөлігінің тиімді өлшемін бағалау үшін, заряд микроразрядтың тосқауылға жақын бөлігіне өткен болса, мына мәнді аламыз. Бұл өте дәл жуықтау, өйткені $\Phi(1) = 0,84$, ол $\Phi(\infty) = 1$ шекті мәнге жақын. Осы жуықтау негізінде мынаны аламыз:

$$x_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{2t_{\text{микр}}}{R_3 C_0}}. \quad (3.64)$$

Ол үшін $t_{\text{микр}} = (5,6 + 6,3) \cdot 10^{-9}$ с, $R_3 = 10^4$ Ом, $C_0 = 10^{-8}$ Ф/м² ескеру керек $x_{\text{эфф}} = 15$ мм.

Кедергісі жоғары электродты анықтайық. 3.12 - суретте жоғары кедергі бетінің сызбасы көрсетілген (енгізілген кедергіні есептеуге арналған электрод).



Сурет 3.12 – Кедергісі жоғары электродтың бетінің қимасы

3.12 - суретке негізделген мынадай қатынас бар:

$$d \cdot r_{\text{внос}} = R_3 \frac{dr}{2\pi r} \quad (3.65)$$

Сонда енгізілген кедергінің мәнін мына формула бойынша анықтауға болады:

$$r_{\text{внос}} = \int_{r_0}^{x_{\text{эфф}}} R_3 \frac{dr}{2\pi r} = \frac{R_3}{2\pi} \ln \frac{x_{\text{эфф}}}{r_0} \quad (3.66)$$

мұндағы $r_0 = d_0/2$ - микроразрядтың жақын бөгет аймағының радиусы болып табылады. Онда $R_3 = 10^4$ Ом, $x_{\text{эфф}} = 15$ мм, $r_0 = 2,8$ мм болғанда $r_{\text{внос}} = 0,27$ $R_3 = 2700$ Ом, бұл алдыңғы есептеулермен (3.20) өрнекті қанағаттандырады.

3.3 Таратылған параметрлері бар цилиндрлік координаталардың математикалық модель

Тосқауылдағы екі өлшемді озон өңдеу жүйесін қарастырайық (цилиндрлік симметриялы беттік разряд 3.6 – суретте келтірілген). Электр разряды ауада орын алады. Тосқауыл беттің иондануы мен дамуының шарты ретінде, шекті қарқындылық мәнінің разряд аймағындағы жетістігін қабылдаймыз онда электр өрісі $E_0 = 24,5$ кВ/см [97]. Электр разрядымен озон өңдеу жүйесі үшін жоғары өткізгіш электродтармен беттік микроазрядтарды есептеуге арналған ΔT өмір сүру ұзақтығын және ξ_{max} ұзындығын бағалауға мүмкіндік беретін математикалық өрнектер қажет [93]. Озонды өңдеу жүйелерінде кедергісі жоғары электродтары бар тосқауыл разряды жақсы нәтиже береді. Ол цилиндрлік бөгет бетінің разрядын модельдеу (3.67, 3.69) өрнектер түрінде болады. Жүйені қарастырған кезде жеке микроазрядтың қызмет ету мерзімі мен кедергісі жоғары разрядта озонның түзілуіне сәйкес, цилиндрлік электродтардың координаттар жүйесіндегі өрнекпен анықталады (3.67):

$$\Delta T = \frac{(U_0 - U_s)^2 \exp[-2(\rho_s + r_{доб})C\gamma^2]}{4\gamma^2 E_0^2 \left(\int_{\gamma\sqrt{(\rho_s + r_{доб})}}^{\infty} \frac{1}{\theta} \exp(-\theta^2) d\theta \right)^2}, \quad (3.67)$$

мұндағы U_0 – цилиндрлік электродтағы кернеу (В); U_s - бөгет бетіндегі жерге қатысты асқын кернеудің уақыт моменті $t = 0$, (В);

ρ_s – разряд аймағындағы бетке жақын меншікті кедергі, (Ом);

$r_{доб}$ – цилиндрлік электрод тізбегіндегі қосымша кедергі, Ом;

γ – (100) теңдеуден анықталған параметрі, $m \cdot c^{-0.5}$;

$C \approx 3 \cdot 10^{-8}$ Ф/м² аудан бірлігіндегі диэлектрлік кедергінің сыйымдылығы болып табылады;

$E_0 = 2,45 \cdot 10^6$ В/м - электр өрісінің шекті кернеуінің мәні;

θ - координаталар центрінен қашықтығына сәйкес келетін айнымалы z бағыты.

Біріншідегі кедергі бетіндегі қалдық зарядтан U_s кернеуіне жақындау кезінде оны нөлге тең етіп қабылдаймыз (бұрынғы разрядтар болған жоқ). Беттік микроазрядтың максималды ұзындығы мына формула мен анықталады:

$$\xi_{max} = r_3 + 2\gamma\sqrt{\Delta T}. \quad (3.68)$$

$r_3 = 1$ мм деп алайық.

γ параметрін төмендегі мына теңдеуді шешу арқылы анықтауға болады:

$$\frac{\exp[-(\rho_s + r_{доб})C\gamma]}{\int_{\gamma\sqrt{(\rho_s + r_{доб})}}^{\infty} \frac{1}{\theta} \exp(-\theta^2) d\theta} = \frac{2en_e\gamma^2 b(\rho_s + r_{доб})(1 + a\delta)}{U_0 - U_s}, \quad (3.69)$$

мұндағы e – электрон заряды, n_e – беттің иондалған микроразряд аймағындағы электрон концентрациясы, b – беттік микроразрядтың иондалған аймағының орташа биіктігі, $\delta \ll \xi_{\max}$ – жаңа электр зарядтары мен генерацияланатын аймақтың ені, α – қалыпты жағдайда әсер етуші иондану коэффициенті (Таунсенд). Ауаның тығыздығын (3.70) формула бойынша анықтауға болады [97]:

$$\alpha = 0,2 \cdot (E - E_0)^2, \quad (3.70)$$

мұндағы E – микроразряд бетіндегі арнадағы электр өрісінің кернеулігі.

Әр түрлі электрод полярлығында пайда болатын тосқауыл разрядының (теріс және оң) геометриялық және электрлік параметрлерінде елеулі айырмашылықтар бар [35, 102, 103, 104]. Арна құрылымында микроразряды бар бетке жақын электродтың оң және теріс полярлығы өрнектерден белгілі. Ал беттік разряд арнасының мұндай полярлығы жоқ.

Сондықтан бұл математикалық модель үрдісті сипаттау үшін қолайлы. Тосқауыл бетінің микроразрядының дамуы тек оң электродтардың полярлығына жақын. Бұл мынадан туындайды (3.67) теңдеу бойынша математикалық модельде, микроразрядтың ұзындығы ξ_{\max} өседі, ал γ параметрі болса микроразрядтың қызмет ету мерзіміне пропорционал тұрақты мән болып қалады. Теріс жағдайда микроразрядтың дамуы бетке жақын электродтың полярлығы кеңістікте шектелген [35,104]. Сондықтан бұл математикалық модельді қолдану атап айтқанда, теңдеу (3.67) мұндай үрдісті сипаттау үшін ΔT уақыт шектеуі қажет. Микроразрядтың дамуы немесе γ параметрінің сызықты еместігін енгізу, бұл ғылыми зерттеу жұмысында қарастырылмайды. n_e және b параметрлерін оң полярлығы бар электрод кедергі бетінің микроразряды бойынша жазамыз (3.1 - кесте) [35].

Кесте 3.1 – Электрондардың концентрациясы және иондалған қабаттың қалыңдығы (оң полярлықтағы тосқауылды электрод бетіндегі микроразряд) [35].

Параметрлер	Беттік электродтың полярлығы
	Оң бағытты
Микроразряд аймағындағы электрондардың концентрациясы, m^{-3}	10^{21}
Иондалған аймақтың орташа биіктігі	$100 \cdot 10^{-6}$

Басқа еңбектерден белгілі [35, 90, 91] және осы ғылыми зерттеу жұмысынан алынған (3.17) беттік микроразрядтың ұзындығы шамамен $10^{-3} - 10^{-2}$ м. Электродтағы жоғары электр өрісінің кернеулігінің үлкен мәндері жақын беттің оң полярлығына сәйкес келеді. Демек, шекті мәннен асатын E электр өрісінің мәндері үшін жарамды $\alpha \delta$ қатынасы $\ll 1$. Ал E_0 электр өрісінің мәні бірнеше еседен аспайды.

Шығару аймағындағы бетке жақын меншікті кедергі үшін иондалған газ анықталады (беттік разрядтық плазмаға арналған). Ом заңына негізделген иондалған аймақтың беттік разряд өткізгіштігі бөгеттің белгілі параметрлері бойынша (3.71) теңдеуден анықталады.

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{j}{E/N_L} \cdot \frac{1}{N_L}, \quad (3.71)$$

мұндағы $j = 10^6 \text{ A/m}^2$ тосқауыл микроразрядындағы ток тығыздығы [86], $E/N_L = 100 \text{ Td} = 100 \cdot 10^{-21} \text{ В} \cdot \text{м}^2$ - кернеудің орташа мәні беттік микроразряд арнасындағы электр өрісі [35], $N_L = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ қалыпты жағдайдағы Лошмидт тұрақтысы. Осыдан кейін беттік микроразрядтың меншікті (көлемдік) өткізгіштігі мынаған тең:

$$\sigma = \frac{10^6}{10^{-19}} \cdot \frac{1}{2,687 \cdot 10^{25}} \approx 0,4 \text{ См/м}$$

Меншікті көлемдік өткізгіштіктің алынған мәні жақсы сәйкес келеді әлсіз иондалған плазманың белгілі параметрлерімен [98]. Беттік микроразрядтың активті кедергісін қарастырайық (3.72) және (3.73) өрнектер арқылы:

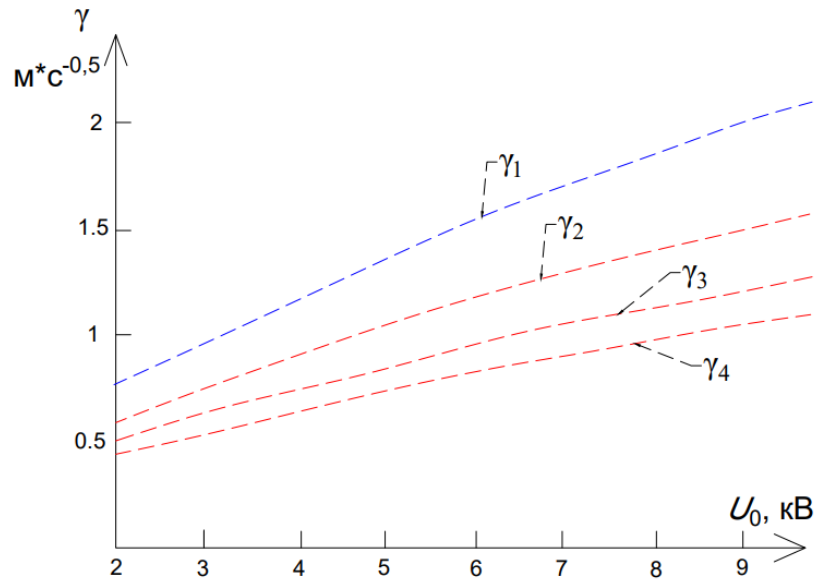
$$\rho_s \frac{\xi}{x} = \rho_V \frac{\xi}{x \cdot b}, \quad (3.72)$$

$$\rho_s = \frac{\rho_V}{b} = \frac{1}{\sigma \cdot b}, \quad (3.73)$$

мұндағы ξ - беттік микроразрядтың ұзындығы, x - беттік микроразрядтың ені, ρ_V – беттік микроразрядтың меншікті көлемдік кедергісі.

$$\rho_s = \frac{1}{0,4 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} \approx 2,5 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

Белгілі параметрлердің мәндерін ауыстыру арқылы γ параметрін (3.69) теңдеу арқылы анықтайық. Өртүрлі γ параметрінің U_0 кернеуіне тәуелділігі үшін қосымша кедергі мәндері 3.12 - суретте көрсетілген (оң полярлық бетке жақын электрод).

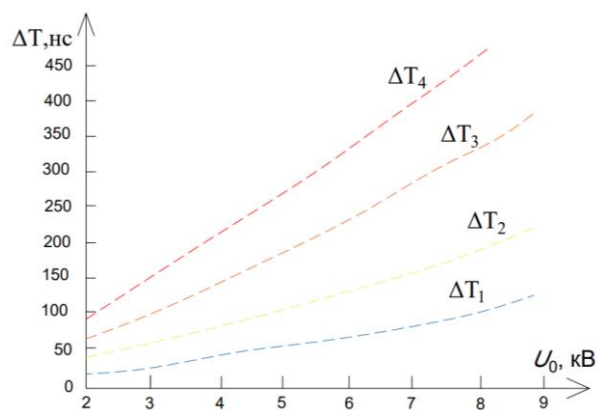


Сурет 3.13 – γ параметрінің цилиндрлік электродтағы кернеуге тәуелділіктері қосымша кедергінің әртүрлі мәндері: 1 – $r_{к,к} = 0$; 2 – $r_{к,к} = \rho s$; 3 – $r_{к,к} = 2\rho s$; 4 – $r_{к,к} = 3\rho s$;

Жеке беттік микроразрядтың қызмет ету мерзімін анықтайық. (3.69) өрнегін ескере отырып (3.68) теңдеу мына түрді жазылады:

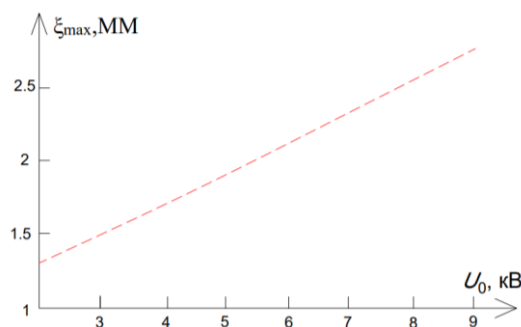
$$\Delta T = \left(\frac{e \cdot n_e \cdot \gamma \cdot b (\rho_s + r_{к,к})}{E_0} \right)^2 \quad (3.74)$$

Жеке микроразрядтың ΔT уақытының тәуелділігі мен γ - ң табылған мәндерін ескере отырып, бетке жақын электродтағы кернеу үшін қосымша кедергінің әртүрлі мәндері (3.14 - суретте көрсетілген бетке жақын электродтың оң полярлығы).



Сурет 3.14 – Беттік микроразрядтың өмір сүру ұзақтығы мен қосымшаның әртүрлі мәндерінде цилиндрлік электродтағы кедергіге түсетін кернеу арасындағы тәуелділік: 1 – $r_{к,к} = 0$, 2 – $r_{к,к} = \rho s$, 3 – $r_{к,к} = 2\rho s$, 4 – $r_{к,к} = 3\rho s$.

Қарастырылатын беттік микроразрядтың $\xi_{\max, \text{ММ}}$ ұзындығының математикалық модельінің теңдеулері (3.67 – 3.69) өрнектерде қарастырылған. Оның графикалық кескіні төмендегі 3.14 - суретте көрсетілген.



Сурет 3.15 – Беттік микроразряд ұзындығының цилиндрлік электродтан өтетін кернеуге тәуелділігі

Микроразряд уақыты 3.14 - суреттегі нәтижелермен жақсы келтірілген. Жоғары электродтары бар озон өңдеу жүйелерінің осциллографиялық зерттеулері келесі бөлімдерде көрсетілген. Сонымен бірге уақыт микроразряд тізбектегі электродтың кедергісіне пропорционал.

Беттік микроразрядтың кедергі аймағының диаметрі мынадай: $U_0 = 10$ кВ кезінде $d_6 = 2\xi_{\max} = 5,2$ мм. Бұл деректер есептеу нәтижесінде алынған мәнмен жақсы сәйкес келеді.

3.4 Таратылған параметрлері бар жүйенің математикалық моделі

Микроразрядтың екінші кезеңі барысында (3.3 - сурет), оның микроразрядтық арнаның тосқауылға жақын иондалған аймағын қайта зарядтау мүмкін. Ол негізінде математикалық модельді пайдаланып, жиынтық параметрлері бар эквивалентті тізбектерге (3.5 - суретті қараңыз) арналып жазылған. Себебі екінші кезеңде микроразрядтың тосқауылға жақын бөлігінің геометриясы стационарлы болады.

Эквивалентті тізбектегі ток күшін есептеу (3.3 - сурет), белгілі Кирхгоф заңдарына сәйкес жасалған [52] және оның нәтижесін былай жазуға болады:

$$i_{\text{МК}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (3.75)$$

мұндағы p_1 және p_2 5 - суреттегі тізбектің сипаттамалық теңдеуінің түбірлері.

A_1 және A_2 - бастапқы шарттардан табылған тұрақтылар және олар мына формулалармен анықталады:

$$A_1 = \frac{i_{\text{МК}}(0)}{p_2 - p_1} \cdot \left[p_2 + \frac{1}{r_{\text{МК}}} \left(\frac{1}{C_{\text{МК}}} + \frac{1}{C_3} \right) \right], \quad (3.76)$$

$$A_2 = A_1 + i_{\text{МК}}(0) = \frac{i_{\text{МК}}(0)}{p_1 - p_2} \cdot \left[p_1 + \frac{1}{r_{\text{МК}}} \left(\frac{1}{C_{\text{МК}}} + \frac{1}{C_3} \right) \right] \quad (3.77)$$

(3.76) және (3.77) өрнектеріндегі түбірлердің мәндері 3.5 – суреттегі электрлік сұлба параметрлеріне өз кезегінде конструктивті байланысты. Ол разрядты озондау камераларының параметрлері болып табылады. Қатты жазықтық - параллель электродтары бар конструкциялар үшін (3.1, а - сурет) $C_3 \gg C_{\text{МК}}$ қатынасы дұрыс, онда түбірлерге арналған өрнектер сипаттамалық теңдеуді мына түрде табуға болады:

$$p_{1,2} \approx \frac{-(C_{\text{МК}} + C_3)r_{\text{НАҚТЫ}} - r_{\text{МК}}C_{\text{МК}} \pm [(C_{\text{МК}} + C_3)r_{\text{НАҚТЫ}} - r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}]}{2r_{\text{МК}}r_{\text{НАҚТЫ}}C_3C_{\text{МК}}}, \quad (3.78)$$

$$p_1 = -1/r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}, \quad p_2 = -1/r_{\text{НАҚТЫ}}C_3. \quad (3.79)$$

(3.76) және (3.77) формулалары арқылы A_1 және A_2 интегралдау константаларын есептеуге болады:

$$A_1 \approx -\frac{u_{\text{НАҚТЫ}} - u_3}{r_{\text{МК}}} \cdot \frac{C_{\text{МК}}}{C_3}, \quad A_2 \approx \frac{u_{\text{НАҚТЫ}} - u_3}{r_{\text{МК}}}, \quad (3.80)$$

мұндағы $U_3 \approx 0,47 U_{\text{НАҚТЫ}}$ – микроразрядтың бастапқы сыйымдылығына қолданылатын кернеу. Нәтижесінде микроразрядтық токтың өрнегі келесідей болады:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{u_{\text{НАҚТЫ}} - 0,47u_{\text{НАҚТЫ}}}{r_{\text{МК}}} e^{\frac{-t}{r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}}} - \frac{u_{\text{НАҚТЫ}} - 0,47u_{\text{НАҚТЫ}}}{r_{\text{МК}}} \frac{C_{\text{МК}}}{C_3} e^{\frac{-t}{r_{\text{МК}}C_3}} \quad (3.81)$$

$C_3 \gg C_{\text{МК}}$ екенін ескере отырып, екінші мүшені елемеуге болады соңында мынаны аламыз:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53u_{\text{НАҚТЫ}}}{r_{\text{МК}}} e^{\frac{-t}{r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}}}. \quad (3.82)$$

Микроразрядтың активті кедергісін ($r_{\text{МК}}$) өзгерту арқылы (3.82) формуладан токқа әсер ете алатынын көруге болады. Егер озондау камерасының электродтары ретінде жоғары кедергілі электродтар қолданылса, микроразрядтық токтың шамасын азайтуға және сәйкесінше арттыруға болады (микроразряд уақыты тұрақты $\tau_{\text{МК}} = r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}$).

Секциялық электродтары бар құрылымдар үшін $C_3 < C_{\text{МК}}$ қатынасы жарамды. Тізбек параметрлерінің әсерін талдау (интегралдау константалары) бұл жағдайда түбірлердің бірі болатынын көрсетті. Бұл жағдайда қалған түбір келесідей болады:

$$p = -\frac{1}{(C_{\text{МК}} + C_{\text{Э}})r_{\text{НАҚТЫ}} + r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}} \approx -\frac{1}{C_{\text{МК}}(r_{\text{НАҚТЫ}} + r_{\text{МК}})}. \quad (3.83)$$

Микроразряд тогы мына формуламен анықталады:

$$i_{\text{МК}} = Ae^{pt}, \quad (3.84)$$

мұндағы

$$A = i_{\text{МК}}(0) = (u_{\text{НАҚТЫ}} - u_{\text{З}})/(r_{\text{МК}} + r_{\text{НАҚТЫ}})$$

Соңында алатынымыз:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53u_{\text{НАҚТЫ}}}{r_{\text{МК}} + r_{\text{НАҚТЫ}}} e^{\frac{-t}{(C_{\text{МК}} + C_{\text{Э}})r_{\text{НАҚТЫ}} + r_{\text{МК}}C_{\text{МК}}}}. \quad (3.85)$$

$C_{\text{Э}} < C_{\text{МК}}$ деп есептегенде (3.86) өрнек жеңілдетілген түрде келесідей болады:

$$i_{\text{МК}} \approx \frac{0,53u_{\text{НАҚТЫ}}}{r_{\text{МК}} + r_{\text{НАҚТЫ}}} e^{\frac{-t}{C_{\text{МК}}(r_{\text{НАҚТЫ}} + r_{\text{МК}})}}. \quad (3.86)$$

Бұл жағдайда микроразрядтық токтың төмендеуіне байланысты қуат көзінің кедергісін (қосымша резисторды қосу) жасанды арттыру арқылы алуға болады. Секциялы электрод конструкциясы бар озонаторларда, оның ішінде разряд беті бар озон камерасында, резисторларды айтарлықтай қашықтықта орналастыруға болады. Осылайша разряд аралығындағы жылды азайту арқасында озон синтезі тиімдірек болады.

Ш тарау бойынша қорытындылар

Қорыта келе жоғары кедергілі электродтың меншікті беттік кедергісі $R_{\text{Э}} = 10^4$ Ом және беттік микроразрядтың максималды ұзындығының (3мм) мәні сол сияқты электродтар арасындағы кернеуде (10 кВ) есептелді.

Диэлектрлік тосқауылдың қалыңдығы (1 мм), салыстырмалы өткізгіштік мәні ($\epsilon = 3,5$), әзірлеу уақыты мен ұзындығы 3 мм - ге дейінгі беттік микроразряд (3 нс) есептелді. Бұл шамамен 10^6 стримердің ұзару жылдамдығына сәйкес келеді. Беттік микроразрядтық токтың максималды мәні беттік кедергісі 10^4 Ом жоғары кедергілі электродтардың максималды микроразряд тогы мен $I_{\text{м}} = 0,64$ А, ол белгіліге эксперименттік мәліметтерге $0,1 \text{ А} < I_{\text{м}} < 1 \text{ А}$. сәйкес келді. Микроразряд кезінде берілген электр зарядтарының мәндері разряд тізбегінің кедергісіне байланысты болмайды.

Беттің алған заряды қалыптасу сатысындағы микроразряд, $q'_{\text{форм}} = (2,1 - 4,3) \cdot 10^{-9}$ Кл. тең екені анықталды. Қайта зарядтау кезінде яғни соңғы кезеңде микроразряд арқылы алынған заряд мынаған тең $q_{\text{зав}} = 4,85 \cdot 10^{-9}$ Кл. Микроразряд арқылы тасымалданатын жалпы заряд мынаған тең деп есептелді $q = (7 - 9) \cdot 10^{-9}$ Кл. Соңғы кезеңнің уақыт константасының мәні есептелді беттік микроразряд үшін $\tau = 7,5$ нс.

Микроразрядтағы энергия балансы реактивті қосынды арқылы және микроразрядтың активті энергиясы анықталды. Энергияның активті бөлігі екі құрамдас бөліктерден тұрады: электродқа жақын шығындардан және Джоуль энергиясының жоғалуынан. Беттік микроразряд ағыны кезіндегі электродқа жақын энергия шығындарының есептелген мәні $0,7 \cdot 10^{-5}$ Дж (Джоуль шығындарының мәні $3 \cdot 10^{-5}$ Дж). Озон өңдеу жүйелерінің жұмысының шекті режимдері, жоғары кедергілі электродтармен көлемдік кедергі разряды, кернеудің шектеу жиілігі және жоғары кедергілі электродтарды қолдану тиімділігі анықталды. Мұндай шектеу жиілігінің мәні олардың арасындағы қашықтыққа байланысты іргелес ток кедергісі мен жоғары электродқа әкеледі. Ток өткізгіштері арасындағы қашықтық (30 см) және жоғары кедергілі электродтың беттік кедергісі (10^4 Ом) электродтарды тиімді пайдаланудың режиміне әкеледі (шектеулі жиілігі 3 кГц). Ағымдағы сымдар арасындағы қашықтық 1 см-ге дейін азайған кезде, бұл шек шамамен үш есе азаяды, ал осы кезде кесу жиілігі 3 МГц дейін артады.

Жоғары кедергінің бетіндегі тиімді қашықтықты бағалау микроразряд үрдісіне қатысатын электрод арасындағы 15 мм қашықтық тең. Бұл жағдайда жоғары кедергілі электродтың кедергісінің мәні 2,1 кОм құрайды. Таратылған параметрлері бар озон генерациялық жүйелердің математикалық модельді цилиндрлік координаттар жүйесіндегі жоғары кедергілі тәжіленуші электродтары бар беттік микроразрядтың ұзақтығын, сонымен қатар даму уақытын бағалауға мүмкіндік береді. Бұл математикалық модель разрядты әзірлеу уақытына сәйкес әрі микроразрядты төзімділік параметрлеріне (шамамен 50 - 100 нс) пропорционал және қоректендіру кернеуіне байланысты болып табылады. Кедергінің жоғарылауымен, тізбекке енгізілген микроразряд және разрядтың даму уақыты өзара пропорционал артады. Осыған сәйкес беттік микроразрядтың ұзындығы математикалық модельді құрған кезде, тізбекке енгізілген кедергіге тәуелді емес.

Озонды өңдеу жүйесі үшін жеңілдетілген математикалық модель озонатор камерасындағы кедергісі жоғары тәжіленуші электродтардың конструкциясы (қатты және секциялы электрод) нәтижелерінен алынған. Зерттеу жұмысы кезінде тосқауылдағы микроразряд үрдісін зерттеу біркелкі модельде өскенін көрсетеді. Ол микроразряд тізбегінің кедергісі кезіндегі амплитуданың төмендеуіне сәйкесінше микроразряд импульсінің ұзақтығының бір мезгілде артуына әкеледі.

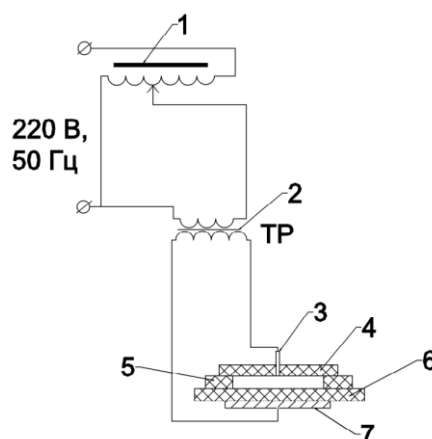
Озондау камерасында тәжіленуші электродтарды пайдаланылған жағдайда жоғары кедергілі электродтардағы микроразрядтық токтың мәнін азайтуға немесе сәйкесінше, микроразряд уақытының тұрақтысын көбейтуге болады. Секциялы электроды бар озондаушы камерада микроразряд тоғының төмендеуі қуат көзінің кедергісін жасанды түрде арттыру арқылы алынған (қосымша резисторды қосу арқылы).

4 ТӘЖІ РАЗРЯДЫ КӨМЕГІМЕН ОЗОНДЫ ӨНДЕУ ЖҮЙЕСІН ТӘЖІРИБЕЛІК ЗЕРТТЕУ

4.1 Озонды өңдеу үшін жасалған құрылғының макеті арқылы физикалық модельдеу үрдісін зерттеу

Алдыңғы бөлімдерде жүргізілген үрдістердің математикалық сипаттамасының күрделілігін ескере отырып, электр разрядына негізделіп жасалған озонатор көмегімен кейбір мәселелерді физикалық модельдеу арқылы орындаған жөн. Бұл зерттеулерге қатысты тиімділікті арттыруға мүмкіндік беретін бірден бір жол электрофизикалық үрдістерді модельдеу. Электрлік параметрлердің ішінде яғни озон өңдеу жүйелерінің өнімділігін арттыратын негізгі шама ол тәжіленуші электродтар.

Озонның өнімділігі мен энергия тиімділігін эксперименттік жолмен арттыруды зерттеу үшін тәжі разрядына негізделген озонатор жүйелерінің соның ішінде тәжіленуші электродтардың іргелі физикалық моделі жасалды. Себебі электр тізбегінің параметрлерін өзгертуге мүмкіндік беретін озонатордың параметрлерінің бірі микроразряд тудыратын тәжіленуші электрод екені белгілі. Бұл модель камера түрінде жасалған жазық - параллель электродтары бар тәжі разряды, оның бір электроды озонатордың негізгі элемент болып табылады (4.1 - сурет).



Мұндағы. 1 - реттелетін автотрансформатор; 2 - бірфазалы трансформатор $U_{нн} = 100 В$, $U_{вн} = 10000 В$; 3 - шекті секцияланған электрод; 4 - диэлектрлік субстрат 5 - қалыңдығы разряд аралығының биіктігін анықтайтын тығыздағыш 6 - диэлектрикалық барьер; 7 - қатты жазық параллель электрод.

Сурет 4.1 – Бірнеше секциялы электроды бар тәжі разрядтық камера

4.1 - суреттегі диэлектрлік тосқауыл фольгадан жасалған шыны талшық, сол себепті электрод пен тосқауыл ажырамас құрылым болып табылады.

Электродтың - ядро диаметрі 2 мм, плексиглас субстратына орнатылған және эпоксидті желіммен бекітілген алюминий оқшауланған кабельдің бөлігі. Аралық бөліктің қалыңдығы және сәйкесінше разряд саңылауының биіктігі 1 мм. Диэлектрлік тосқауылдың қалыңдығы 1 мм. Төтенше секциялы электродтың диаметрі 2 мм бір немесе бірнеше микроразрядтардың бетінен ағып кетуіне мүмкіндік беретін 1 мм ретті кедергі микроразрядының кеңейтілген бөлігінің диаметріне сәйкес келеді. Электродтар арасындағы электр өрісінің салыстырмалы түрде аз бұрмалануы бар (секциялы электродтың). Аса секциялы электроды бар бөгеттік разрядтық камераның фотосуреті 4.2 - суретте көрсетілген.



Сурет 4.2 – Шекті секцияланған электродпен тосқауыл камерасының фотосуреті

Шекті секцияланған электроды бар тосқауыл разрядының камерасы (4.1, 4.2 - сурет) электр тізбегінің әртүрлі параметрлері бар тосқауыл микро разрядтары импульстарының параметрлерін осциллографиялық зерттеуге арналған. Микро разрядтар тізбегінің параметрлерін өзгерту резисторлар, конденсаторлар және т.б. сияқты компоненттердің өте бөлінген электродына қосылу арқылы жүзеге асырылады.



а)



б)

Мұндағы электродтар: а - күйе және графит негізіндегі жоғары дәрежелі электродпен, б-жоғары өткізгіш фольга электродымен.

Сурет 4.3 – Үздіксіз жазық параллельді разрядты озонатор камерасының фотосуреттері

Тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерінің параметрлерін электродтардың әр түрлі кедергісімен эксперименталды салыстыруды жүзеге асыру үшін плексигластан жасалған екі диэлектрлік тосқауылдан тұратын, ауа

разрядының аралығымен бөлінген, сыйымдылықты құрайтын, бөлінген ток өткізгіштермен (электродтармен) жабылған ағынды - сорғыш конструкциясының разрядты озонатор камерасы жасалды (4.3 - сурет). Қатты жазық параллель электродтары бар разрядты озонатор камерасының бұл түрі 3.1(Б-Б) (а) - суретте схемалық түрде бейнеленген.

Разряд камерасы (4.3 - сурет) келесі параметрлерге ие:

- электродтардың разрядтық ауданы 480 см²,
- разряд аралығының биіктігі 4,2 мм,
- электрод аралық сыйымдылығы 150 пФ.

Бірнеше - ондаған килоомға дейінгі белсенді беттік кедергісі жоғары қатты электродтарды өндіру технологиясы разрядты озонатор камерасы сыртқы бетіне біркелкі таралған ұсақ дисперсті күйе мен графит ұнтақтарының қоспасы негізінде жұқа қабат жасаудан тұрады (4.2 - сурет, а). Тұтқыр ретінде ыстыққа төзімді органикалық кремний лак пайдаланылды. Көміртекті қара және графит ұнтақтарын әртүрлі пропорцияда араластырып, жоғары төзімділік қабаты жасалды, нәтижесінде әртүрлі беттік кедергісі бар электродтық жабындар пайда болды. Мұндай айырмашылық бұл графитпен салыстырғанда күйе айтарлықтай электр кедергісіне ие және қоспадағы күйе ұнтағының салыстырмалы түрде аз өсуі қоспаны қолданғаннан және кептіргеннен кейін пайда болатын электрод қабатының беткі кедергісінің айтарлықтай жоғарылауына әкеледі.

3.2 - суретте схемалық түрде көрсетілген қатты жазық - параллель электродтары бар разрядтық озонатор камерасының ерекшелігі бөгеттік разрядтық камералардың жобалық нұсқаларының ішіндегі электродаралық сыйымдылықтың ең үлкен мәні болып табылады. Осы конструкциядағы разрядтық камерада бір уақытта ағып жатқан микроразрядтар жиынтығынан (микроразрядтар сериясынан) тұратын тосқауыл разряды кезінде озонатор камерасының ішінара сыйымдылықтарының жергілікті разряды орын алады. Бұл ішінара сыйымдылықтардың геометриясы разряд саңылауының ауданына бөлінген сериядағы жеке микроразрядтарға сәйкес келеді. Мұндай разрядты озонатор камерасындағы микроразрядтың соңғы сатысындағы токты жазық - параллельді жоғары кедергілі электродтары бар озон генерациялау жүйелеріндегі тосқауыл разрядын математикалық модельдеу нәтижесінде алынған (3.83) өрнекке сәйкес анықтауға болады.

Разряд тізбегінің параметрлерін жылдам өзгерту үшін, сондай - ақ қатты жазық - параллель электродтары бар камерамен салыстырғанда электродаралық сыйымдылықтың айтарлықтай төмен мәні бар бөгеттік разрядтық камераның конструкциясын жасау үшін, ағынның разрядтық озонатор камерасы - секциялық электродты шығару конструкциясы жасалды (4.4 - сурет). Разряд камерасы диэлектрлік тосқауылмен және газ разрядтық саңылаумен бөлінген екі электродтан тұрады. Электродтардың бірі секцияланған және газ шығару саңылауының кеңістігінде диэлектрлік тосқауылдың бетінде бір - біріне параллель орналасқан диаметрі 1 мм алюминий сымдарынан тұрады. Басқа электрод қатты өткізгіш материалдан жасалған қатты жазықтық - параллель.

Секциялық электроды бар разрядты озонатор камерасының бұл түрі схемалық түрде жоғарыда көрсетілген (3.2 - суретте).



Сурет 4.4 – Разряд тізбегінің параметрлерін басқару мүмкіндігі бар секциялық электроды бар разрядтық озонатор камерасының фотосуреті

Разрядты озондау камерасының ерекшелігі (4.4 - сурет) секциялық электродтың элементтеріне R,L,C - элементтерін тізбектей қосу арқылы тосқауыл разрядының электр тізбегінің параметрлерін басқару мүмкіндігі болып табылады. Секциялық электродтың элементтерінің әрқайсысының бір ұшы трансформатордың жоғары вольтты орамасының екі терминалының біріне қосылған жалпы электрлік шинаға қосылған. Трансформатордың жоғары вольтты орамасының басқа шығысы разрядты озондау камерасының басқа электродына – қатты өткізгіштігі жоғары электродқа қосылады.

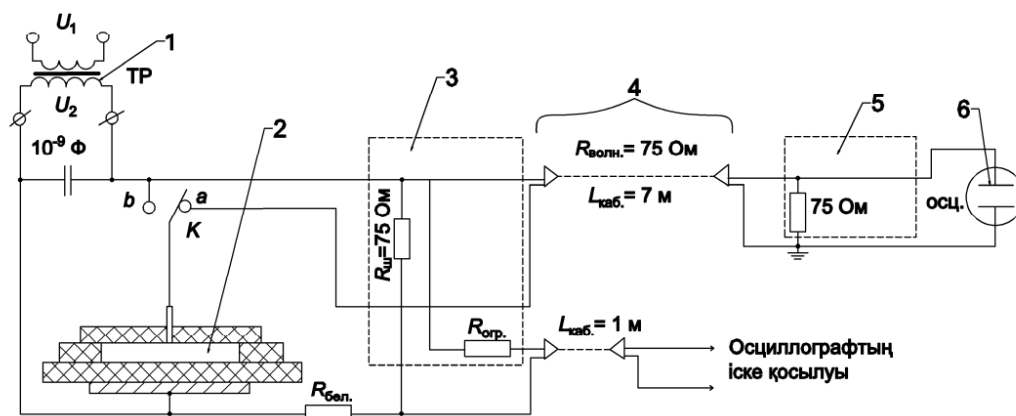
Ғылыми зерттеу жұмысы барысында озонатор қондырғыларының тәжірибелік үлгілері дайындалып, белсенді кедергісі жоғары секциялық электроды бар разрядтық озонатор камералары пайдаланылған үш кәсіпорында өндірістік үрдістерге енгізілді (4.4 - сурет). Іске асыру актілері Б қосымшасында келтірілген.

Б қосымшасында АҚ «Ақтоғай локомотивті сервис орталығы», және ПЧ - 41 «Ақтоғай жол дистанциясы», Шығыс Қазақстан облысы, Аягөз ауданы, Ақтоғай бекетінде жүргізілген ғылыми-өндірістік жұмыстарына енгізілген. Әрбір қондырғының озон сыйымдылығы 10 - 1000 г/м³ озон концентрациясы кезінде 5 г/сағ, тұтынатын қуаты (оттегі концентраторын қоспағанда) 150 - 300 Вт.

4.2 Озон генерациялау жүйелеріндегі тосқауыл разрядын осциллографиялық зерттеу

Микро разрядтардың ток және кернеу импульстарының осциллограммаларын зерттеу бақылау және суретке түсіру арқылы тұрақты токтан 3500 МГц - ке дейінгі жиілік диапазонында 10 мкВ - тан 500 В - қа дейінгі бір реттік және мерзімді электр сигналдарының пішінін зерттеуге арналған тік сканерлеу және көлденең ауытқу арналарында ауыстырылатын блоктары бар әмбебап сақтау С₈₋₁₂ осциллографының көмегімен жүргізілді.

Жеке микро разрядтардың және олардың серияларының ток пен кернеу қисықтарын осциллографтың көмегімен алу және кейіннен суретке түсіру үшін мүмкін болатын кедергілерді болдырмайтын арнайы схема қажет (4.5 - сурет).



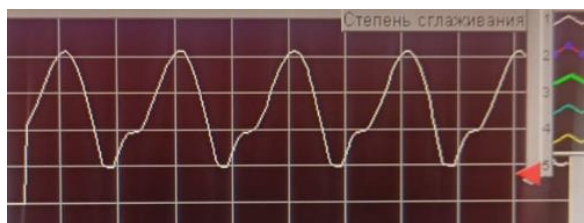
Сурет 4.5 – Микро разряд тогының (а позициясындағы К кілт) және микро разряд кернеуінің (b позициясындағы К кілт) осциллограммаларын алып тастауға арналған қондырғы схемасы: 1 - бірфазалы трансформатор $U_{\text{нн}} = 100 \text{ В}$, $U_{\text{вн}} = 10000 \text{ В}$; 2 - тосқауыл камерасы 3, 5 -сәйкес келетін кедергі блоктары; 4 - 75 Ом толқын кедергісі бар тарату кабелі; 6 - осциллограф.

Осциллограф экранында айқын көріністі алу үшін қажетті сигналдың кешігуін жүзеге асыру үшін осциллографқа сигнал ұзын коаксиалды кабель арқылы беріледі ($L_{\text{каб.}} = 7 \text{ м}$, $R_{\text{волн.}} = 75 \text{ Ом}$), а ал осциллографты іске қосу қысқа кабель арқылы жүзеге асырылады. Кедергілерді жою үшін өлшеу кабелінен оның ұштарына 75 Ом мәнімен 3,5 сәйкес келетін кедергілер қосылған. Осциллографқа $75/2 = 37,5 \text{ Ом}$ эквивалентті кедергіден сигнал келеді. Егер кілт «а» күйінде болса, онда токтың пішінін бекітетін сигнал беріледі.

«b» күйінде - электродтар арасындағы кернеу сигналы. Мұнда жоғары кернеу бөлгіш резистор $R_{\text{бөл.}} = 150 \text{ кОм}$ қолданылады.

Разрядты ұяшықтың қуаты 50 Гц жиіліктегі 9 кВ кернеумен жүзеге асырылды. Осциллограф экранына шығарылатын ток қисықтарын суретке түсіру Canon power Shot A510 сандық камерасы арқылы жүзеге асырылды.

Осциллографта көрсетілген ток қисығының амплитудасының нақты мәндерін анықтау үшін кернеу бойынша зерттеу жүргізілді (4.6 - сурет).



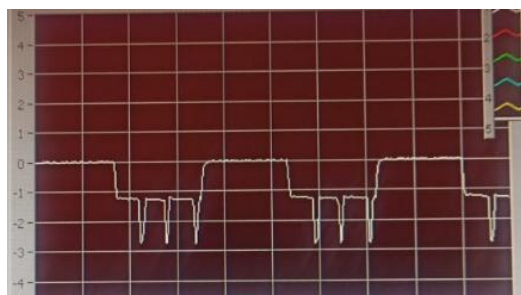
Сурет 4.6 – Кернеудің градуирленуі

4.6 - суретте ауытқу коэффициентіндегі 10В максимумдар арасындағы айырмашылық $k_u = 2 \text{ В/бөл.}$, сканерлеу коэффициент $k_p = 20 \text{ нс/бөл.}$ шамасын тең. Яғни, $k_u = 2 \text{ В/бөл.}$ ауытқуының күшеюі кезінде бөлу мәні $U_{\text{бөл.}} = 5 \text{ В/бөл.}$ шамасында болады.

Демек, ағымдағы қисықтарды алған кезде $ku=2$ В/бөл. ауытқудың күшейту коэффициентіндегі бөлу мәні мынаған тең болады:

$$I_{\text{бөл.}} = \frac{U_{\text{бөл.}}}{R_{\text{ш}}/2} = \frac{5 \text{ В/бөл.}}{37,5 \text{ Ом}} = 0,134 \text{ А/бөл.}$$

Сұлба арқылы (4.5 - суретті қараңыз) разряд камерасындағы кернеу кезінде әдеттегі параметрлері бар микро разряд импульстарының осциллограммаларын алу үшін $U_{\text{нақты}} = 9$ кВ микро разряд тогының осциллограммасы алынды (4.7 - сурет).



Сурет 4.7 – Қалыпты параметрлері бар микро разрядты ток осциллограммасы

- ауытқу коэффициенті 3,3 мА/бөл.;
- сканерлеу коэффициенті 20 нс/бөл.;
- разряд уақыты $T_r \approx 120$ нс

4.7 - суреттен көріп отырғанымыздай, микро разрядтың өтпелі процесі өте айқын тербелмелі компонентке ие, сондықтан тосқауыл микро разрядының параметрлері үшін келесі қатынас орындалады:

$$\frac{r_p^2}{4 \cdot L_p^2} < \frac{1}{L_p \cdot C_p} \quad (4.1)$$

мұндағы, r_p плазмалық каналмен анықталатын микро разрядтың белсенді кедергісі, C_p - электрод аралық сыйымдылықпен анықталатын микро разряд сыйымдылығы плазмалық арна (пФ). L_p - микро разрядтың индуктивтілігі.

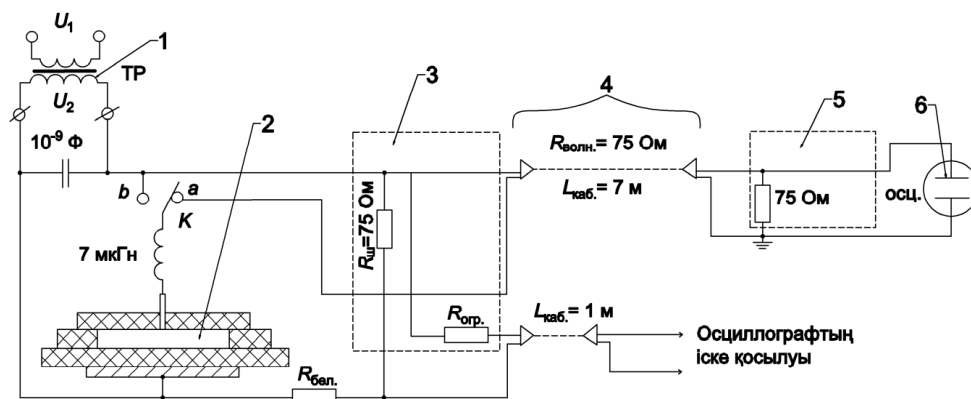
Микро разряд үрдісі кернеудің разряд аралығындағы кернеуге жеткенде басталады, ол электродқа дейінгі кернеудің төмендеу деңгейіне қуат көзінің кернеуінен аз болады (4.2 формуланы қараңыз). Бұл ретте, егер қуат кернеуінің өзгеру жылдамдығы 0,1 - 1 кВ/мкс тәртібінен жоғары болмаса, U_p разряд аралығындағы кернеуді тұрақты деп санауға болады. Тұрақты кернеуге қосылған кезде тербелмелі сипаттағы микро разряд тогын формула бойынша анықтауға болады [84]:

$$i_p = \frac{U_{ист.} - U_{эл.}}{\omega_{св} L_p} \cdot e^{-at} \sin(\omega_{св.} t + \pi), \quad (4.2)$$

мұндағы $\omega_{св}$ микроразряд тізбегінің меншікті тербелістерінің бұрыштық жиілігі, L_p - әлсіреу коэффициенті.

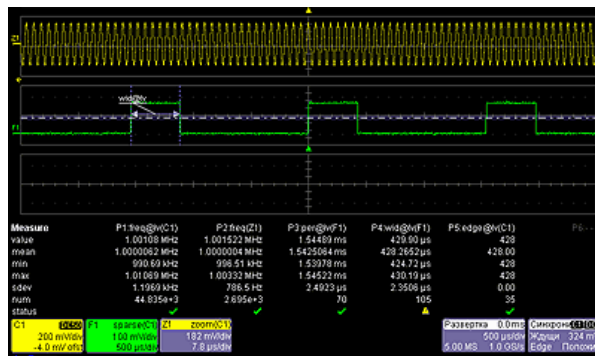
Тосқауылдың микро разрядының тербелмелі сипатын А құру деп түсіндіруге болады құрылым өте секцияланған электродпен төмен электрод аралық сыйымдылыққа ие. Бұл, өрнек бойынша (4.1), микро разряд үрдісінің күшті тербелмелі сипатын тудыруы мүмкін.

Микро разрядтың сипатын нақты жағдайларға сәйкес ету үшін (электродтардың жеткілікті үлкен ауданы), сыйымдылықты арттыру үшін максималды секцияланған электродпен разряд камерасына параллель $C_d = 1000$ пФ сызбаға сәйкес электрод (4.8 - сурет) келтірілген.



Сурет 4.8 – Микроразряд тізбегінің әдеттегі параметрлері және қосымша сыйымдылығы бар тосқауыл разрядты камераны осциллографқа қосу сұлбасы

Сыйымдылықты қосу нәтижесінде микро разрядтың өтпелі үрдісі аperiodикалық сипатқа ие болды (4.9 - сурет).



Сурет 4.9 – Разрядты камерадағы микро разрядты ток импульсінің осциллограммасы шекті секцияланған электродпен және қосымша сыйымдылықпен

4.9 - суретте көрсетілген осциллограмма келесі параметрлерге ие:

- аутыку коэффициенті 110 мА/ бөл.;
- сканерлеу коэффициенті 10 нс/бөл.;
- разряд уақыты $T_p \approx 50$ нс.

Микро разряд сыйымдылығының артуы нәтижесінде микро разрядтың өтпелі үрдісінің сипаты өзгеріп, апериодқа айналды, ток амплитудасы 30 есе өсті, микро разрядтың ұзақтығы 2,5 есе қысқарды

Апериодтық сипаттағы микро разряд импульсі үшін микро разряд тізбегі параметрлерінің келесі қатынасы жарамды:

$$\frac{r_p^2}{4 \cdot L_p^2} > \frac{1}{L_p \cdot C_p} \quad (4.3)$$

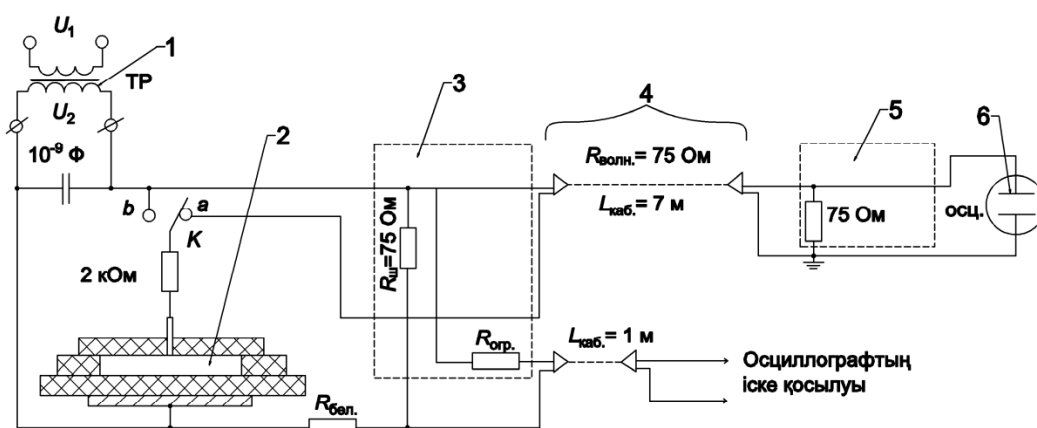
Тұрақты кернеуге қосылған кезде апериодтық сипаттағы микро разряд тогын [84] келесі формула бойынша анықтауға болады:

$$i_p = \frac{U_{\text{нақты}}}{L_p(p_1 - p_2)} (e^{p_1 \cdot t} - e^{p_2 \cdot t}), \quad (4.4)$$

мұндағы

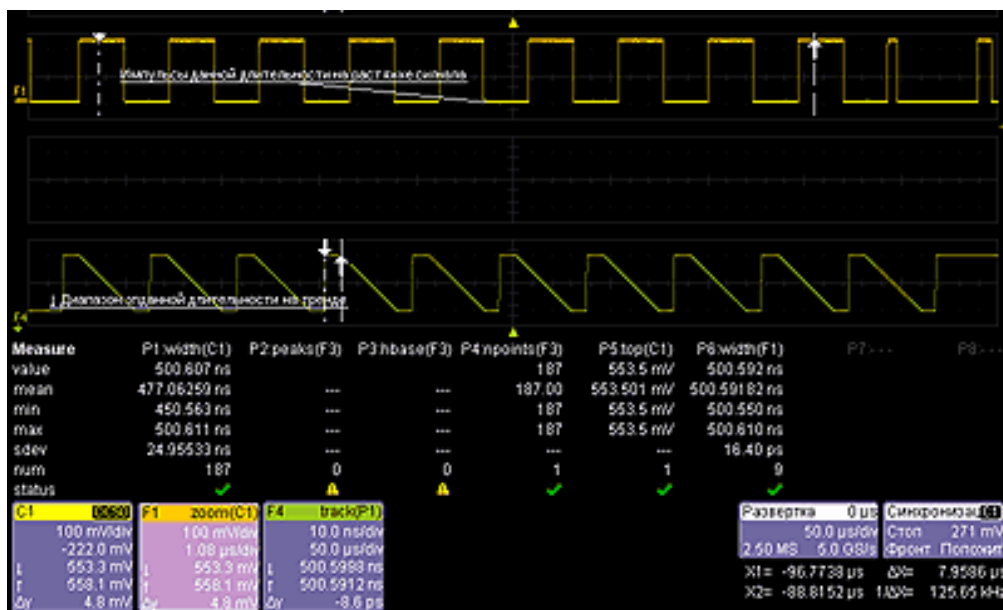
$$p_{1,2} = \frac{-r_p}{2L_p} \pm \sqrt{\frac{r_p}{4L_p^2} - \frac{1}{L_p \cdot C_p}} \quad (4.5)$$

(4.3) қатынасын ескере отырып, p_1 және p_2 нақты сандар болады. 4.10 - суретте электр тізбегінің параметрі өзгертілген микро разрядты ток осциллограммасын алу сұлбасы көрсетілген, атап айтқанда белсенді қарсылықтың жоғарылауы. Микро разряд сыйымдылығы да қосымша сыйымдылықпен өтелді.



Сурет 4.10 – Микро разряд тізбегіндегі қосымша кедергісі және қосымша сыйымдылығы бар тосқауыл разряды камерасының осциллографына қосылу сұлбасы.

Разряд камерасындағы $U_{\text{нақты}} = 9 \text{ кВ}$ кернеу кезінде белсенді кедергісі жоғарылаған микро разрядты токтың осциллограммасы алынды (4.11 - сурет).



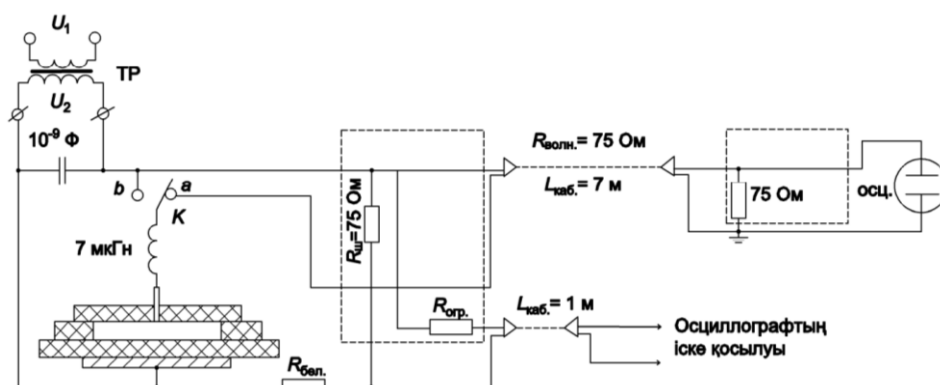
Сурет 4.11 – Белсенді кедергісі жоғарылаған микро разрядты ток импульсінің осциллограммасы

4.11 - суретте көрсетілген осциллограмма келесі параметрлерге ие:

- ауытқу коэффициенті 110 мА/бөл.;
- сканерлеу коэффициенті 50 нс/бөл.

Микро разряд тізбегіне кОм реті бойынша белсенді кедергіні тізбектей қосқанда, микро разрядтың аperiodтық сипаты күшейе түсті. Сонымен қатар, әдеттегі параметрлермен микро разрядпен салыстырғанда (4.7 - суретті қараңыз), τ_3 микро разрядының соңғы кезеңінің уақыт тұрақтысы шамамен 2,5 есе: 100 нс - тен 250 нс-қа дейін өсті. Микро разряд тогының амплитудасы да шамамен 2 есе: 350 мА-дан 200 мА-ға дейін төмендеді.

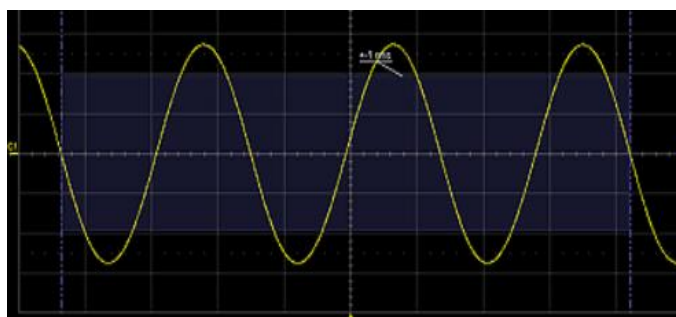
4.12 - суретте электр тізбегінің параметрі өзгертілген, атап айтқанда индуктивтілігі жоғарылаған микро разрядты ток осциллограммасын алу сұлбасы көрсетілген. Бұл жағдайда микро разряд сыйымдылығы қосымша сыйымдылықпен өтелді.



Сурет 4.12 – Микроразряд тізбегіндегі қосымша индуктивтілігі және қосымша сыйымдылығы бар тосқауыл разрядының камерасын осциллографқа қосу сұлбасы

Разряд камерасындағы $U_{\text{нақты}} = 9$ кВ кернеу кезінде индуктивтілігі жоғарылаған микро разрядты токтың осциллограммасы алынды (4.13 - сурет). 4.13 - суретте көрсетілген осциллограмма келесі параметрлерге ие:

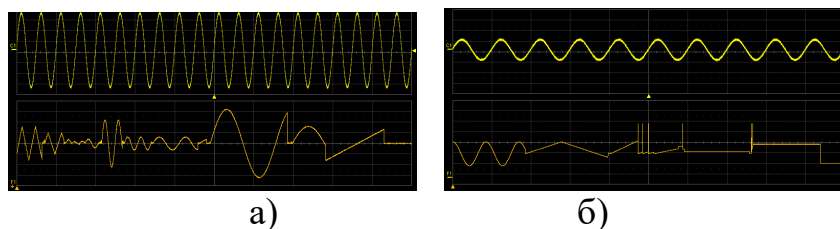
- ауытқу коэффициенті 16,7 мА/бөл.;
- сканерлеу коэффициенті 50 нс/бөл.;
- разряд уақыты $T_p \approx 350$ нс.



Сурет 4.13 – Индуктивтілігі жоғарылаған микро разрядты ток импульсінің осциллограммасы

Индуктивті микроразряд тізбегіне тізбектей қосылған кезде микро разрядтың сипаты аperiodтықтан тербеліске өзгерді. Кәдімгі микроразрядпен салыстырғанда (4.7 - суретті қараңыз) T_p разряд уақыты шамамен 7 есе өсті, микроразряд тогының амплитудасы шамамен 10 есе азайды.

Индуктивтілігі жоғарылаған микро разряд үрдісін анықтайтын негізгі қатынастар (4.1) және (4.2) қатынастар болып табылады. Осциллографты сканерлеу коэффициентінің 5 мкс/бөл. дейін ұлғаюымен әдеттегі өзгермеген параметрлермен (4.14,а-сурет) және микроразряд тізбегінің белсенді кедергісі жоғарылаған микроразрядтар сериясының импульстерінің осциллограммалары алынды (4.14, б - сурет).



Сурет 4.14 – Микроразрядтар сериясының импульстік осциллограммалары: а) әдеттегі параметрлермен; б) белсенді (активті) кедергісі жоғары

4.14 (а, б) - суретте көрсетілген осциллограммалардың бейнесі келесі параметрлерге ие:

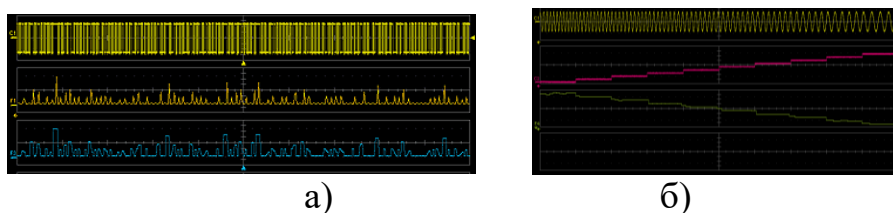
- ауытқу коэффициенті 110 мА/ бөл.;
- сканерлеу коэффициенті 5 мкс/бөл.

Әдеттегі разряд тізбегінің параметрлері кезінде сериядағы жеке микроразрядтар арасындағы орташа уақыт бірнеше микросекундқа тең және жеке микроразрядтардың ұзақтығынан асады. Сериядағы орташа ток максимумы шамамен 200 мА құрайды.

Разряд тізбегінің кедергісі жоғарылаған ток импульстары үшін сериядағы жеке микро разрядтар арасындағы орташа уақыт бес микросекундтан асады және қалыпты параметрлері бар микро разряд импульстары арасындағы уақыттан шамамен екі есе көп. Кедергісі шамамен максимумы болатын микро разрядтар сериясындағы орташа ток 100 мА, бұл әдеттегі параметрлері бар микро разрядтардан екі есе аз.

4.15, а - суретте кәдімгі (өзгермеген) разряд тізбегінің параметрлері бар бірнеше микро разрядтардың ток осциллограммасы көрсетілген:

- ауытқу коэффициенті 110 мА/ бөл.;
- сканерлеу коэффициенті 5 мс/бөл.



Сурет 4.15 – Бірнеше микро разрядтардың ток (а) және кернеу (б) осциллограммалары

Осциллограммадан (4.15 а, сурет.) микро разрядтар сериясы арасындағы уақытты шамамен 5 мс - қа тең анықтауға болады; жеке серияның уақыты да шамамен 5 мс - қа тең. Микро разрядтар сериясының мезгіл - мезгіл пайда болатын ток импульстары (4.15, а сурет.) разряд ұяшығындағы кернеудің мерзімді өзгеруіне сәйкес келеді (4.15, б сурет.). 4.15, б -суретте көрсетілген осциллограмма келесі параметрлерге ие:

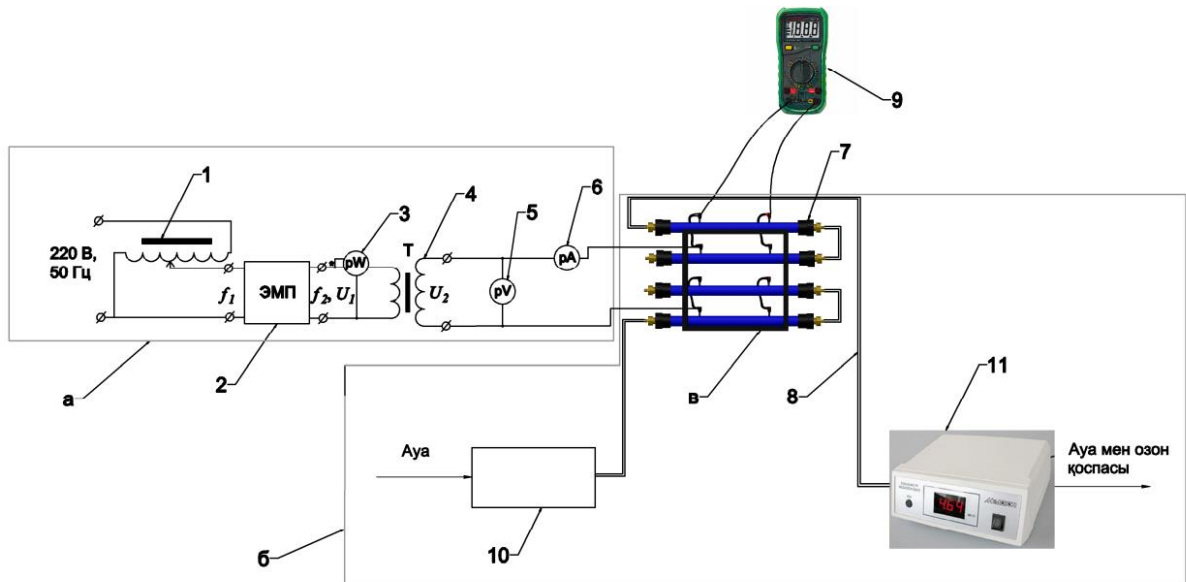
- ауытқу коэффициенті 10 кВ/ бөл.;
- сканерлеу коэффициент 5 мс/бөл.

4.15, б - суреттегі кернеудің өзгеру сипаты қоректендіру кернеуінің әрбір жарты кезеңінде микро разрядтар сериясының пайда болуына сәйкес келеді. Яғни, біртіндеп өсіп, белгілі бір кернеу деңгейіне жеткенде, $U_{\text{нақты.}} = U_{\Gamma} = \text{const}$, кезінде микро разрядтар сериясы пайда болады, бұл 4.15, б - суреттегі осциллограммадағы кернеудің салыстырмалы ұзақ тұрақты мәніне сәйкес келеді.

4.3 Озон өндеу жүйелерін эксперименттік зерттеу және салыстыру

Тәжірибелік қондырғының сипаттамасы.

Озон генерациялау жүйелерінің электрлік параметрлерін, өнімділігін және жылуын әртүрлі конструкциялардағы жоғары өткізгіш және жоғары ток электродтарымен эксперименттік салыстыру схемасы 4.16 - суретте көрсетілген. Бұл ретте озон концентрациясын және құрамында озон бар газдың температурасын өлшеу разрядты озонатор камерасынан шығу кезінде жүзеге асырылды.



Мұндағы: 1 - автотрансформатор; 2 - электромеханикалық түрлендіргіш ($h = 400$ Гц); 3 - ваттметр; 4 - бір фазалы трансформатор $U_{\text{нн}} = 100$ В, $U_{\text{вн}} = 10000$ В, $S = 640$ В·А; 5 - киловольтметр; 6 - миллиамперметр; 7 - разрядты озонатор камерасы; 8 - К типті термопара; 9 - мультиметр; 10 - ауа компрессоры; 11 - озонметр.

Сурет 4.16 – Озонатор камерасындағы электрлік разряд параметрлерін және озон концентрациясын эксперименттік зерттеуге арналған қондырғы: а - электр бөлігі, б - пневматикалық бөлік, в - разряд аймағы.

Эксперименттік қондырғыда (4.16 - сурет) аспаптар және келесі мақсаттарға арналған жабдық:

- АОСН-20-220-75 У4 автотрансформатор типі, 0-240В диапазонында күшейткіш трансформатордың бастапқы орамасына жеткізілетін кернеуді реттеу үшін;
- кернеу жиілігін 400 Гц дейін арттыруға арналған электромеханикалық жиілік түрлендіргіші;
- Ваттметр электродинамикалық түрі Д50043, дәлдік класы 0.5, төмен кернеу тізбегіндегі белсенді (активті) қуатты тұтынуды өлшеу үшін 150 Вт (1 Вт/бөл) өлшеу шкаласының шегі;
- тосқауыл разрядын жүзеге асыру үшін жеткілікті кернеу алу үшін НОМ-10, $S = 640$ ВА, $U_{нн} = 100$ В, $U_{вн} = 10000$ В типті бір фазалы трансформатор; - киловольтметр электростатикалық түрі С 196, дәлдік класы 1.0, өлшеу шегі 15 кВ, бөлу бағасы 0.2 кВ разрядты озонатор камерасының электродтарына қолданылатын электр кернеуінің қолданыстағы мәнін өлшеу үшін;
- Ц423021 типті миллиамперметр, дәлдік класы 2.5, өлшеу шегі 10 мА, бөлу бағасы 0,4 мА, госреестр № 58550-14 разрядты озонатор камерасы арқылы өтетін токтың орташа мәнін өлшеу үшін;
- ДТ - 9908 типті сандық мультиметр, озонатор камерасынан шығатын құбырдың басында К типті термопара арқылы өлшенетін разрядты озонатор камерасынан шығатын температураны бақылауға арналған;
- АР - 9800 типті ауа компрессоры, өнімділігі 1,6 л/мин, разряд камерасы арқылы озон түзетін ауаны айдау үшін 0,012 МПа қысым;
- «Медозон - 254/5а» типті цифрлық озонметр, озонатор камерасынан шығатын озон бар газдағы озон концентрациясын өлшеуге арналған 2,0 - 150,0 г/м³ өлшеу диапазоны;
- УТ81В Сандық мультиметр/осциллограф, разряд камерасындағы кернеу жиілігін өлшеуге арналған.

Экспериментті жүргізуге арналған сұлба (4.16 - сурет.) келесідей жұмыс істейді. Бір фазалы трансформатор арқылы тосқауылды озонаторына $f = 400$ Гц жиіліктегі жоғарғы кернеу беріледі. Кернеу амплитудасы автотрансформатор 1, жиілік электромеханикалық жиілік түрлендіргіші 2 арқылы реттеледі.

Тұтынылатын белсенді қуат 3 ваттметрмен өлшенеді. Разрядты озонатор камерасының кернеуі мен ток мәндерін анықтау үшін киловольтметр 5 және миллиамперметр 6 қолданылады. Озонатор камерасынан шығатын газдың температурасы 9 сандық мультиметрге қосылған 8 термопарамен (к типті) өлшенеді. Озонатор камерасынан шығатын озон ауа қоспасындағы озон концентрациясы 11 сандық озонметрмен өлшенеді.

Осы эксперименттік зерттеулерде озон генерациялау жүйелерінің энергия тиімділігін анықтау мақсатында ваттметр 3 көмегімен төмен кернеу тізбегінде тұтынылатын белсенді қуатты өлшеу жүргізілді (4.16 - сурет.). Разряд камерасында тікелей таралатын белсенді қуатты анықтау үшін ваттметрмен өлшенетін қуат мәнінен тиісті кернеу деңгейінде трансформатордағы белсенді қуат шығынының мәнін алып тастау керек. Эксперименттер кезінде

трансформатордың орамалары арқылы өтетін электр тогы номиналды мәндерден әлдеқайда аз болғандықтан, Трансформатордың белсенді қуатының жоғалуы трансформатордың магниттік құбырындағы шығындарға сәйкес келеді. Бұл шығындар трансформатордың жоғары кернеуінің қолданыстағы мәніне байланысты трансформатордың бос жүріс режимінде тұтынатын қуатын өлшеу нәтижесінде анықталады (4.1 - кесте).

Кесте 4.1 – Трансформатордағы қуаттың жоғалуы

U_2 , кВ	4,6	7,0	8,0	9,0	9,6	10,6
$P_{б.ж.}$, Вт	2,0	4,0	6,0	8,0	10	12

Осылайша разрядта таралатын $P_{оз}$, белсенді қуаты, озонатор камерасы $P_{б.ж}$ белсенді қуатының мәніне ваттметрмен өлшенетін P_w , қуатының мәнінен аз болады:

$$P_{оз} = P_w - P_{б.ж} \quad (4.6)$$

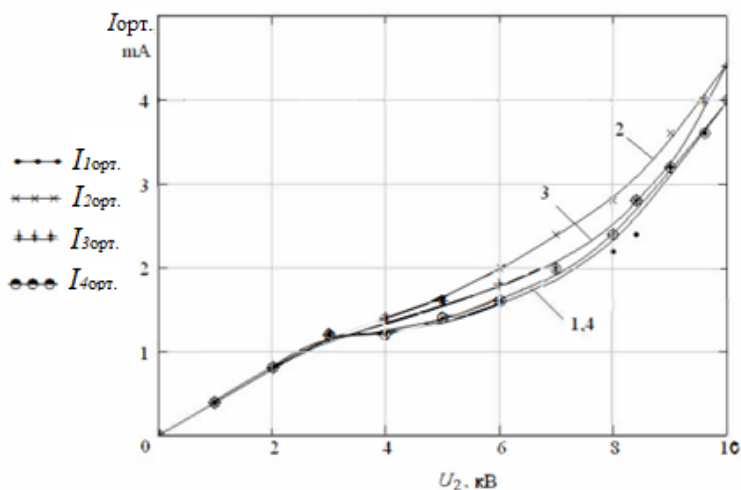
4.1 Тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерін үздіксіз жазық параллель электродтармен эксперименттік зерттеу және салыстыру

4.2-ші кестеде алюминийден жасалған жоғары өткізгіш электродтары бар разрядты камераны зерттеудің тәжірибелік деректері келтірілген (32,а суретті қараңыз).

Кесте 4.2 – Жоғары өткізгіш электродты разрядты озонатор камерасын тәжірибелік зерттеу нәтижелері ($R_{эл.} \approx 0,1$ Ом)

U_2 , кВ	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,4	9,0	9,6	10,0
$I_{орт.}$, мА	0,4	0,8	1,2	1,2	-	1,6	2,0	-	2,4	3,2	3,6	4,0
P_w , Вт	0,2	0,4	0,6	1,2	2,2	3,6	5,0	6,4	7,2	10	12	14
$P_{оз}$, Вт	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	2,0	3,0
хоз, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

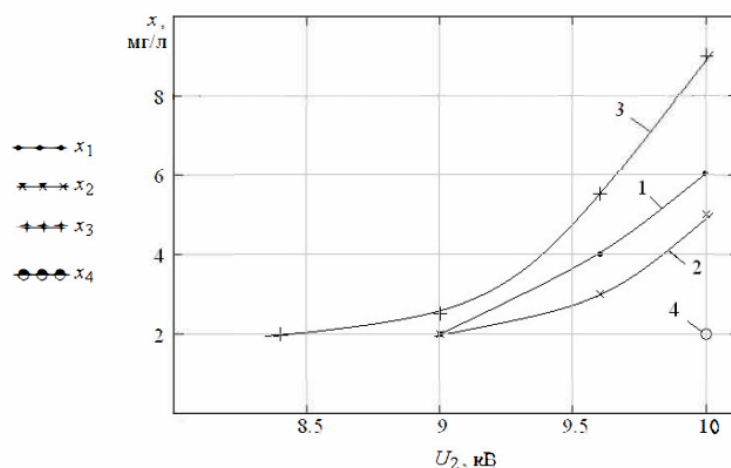
4.2 - 4.3 кестелерде ұсынылған эксперименттік деректердің нәтижелері бойынша үздіксіз жазық параллельді электродтары бар озонатор камерасы электродтарының беттік кедергісінің әртүрлі мәндерінде разрядты озонатор камерасы арқылы орташа токтың $I_{ср.}$ (U_2) разряд камерасындағы кернеудің қолданыстағы мәніне тәуелділігі (4.17-сурет):



Сурет 4.17 – Қатты жазық параллель электродтары бар разрядты камералардың вольт-амперлік сипаттамалары:

Вольт - амперлік сипаттамалары (4.17 - сурет) әртүрлі кедергісі бар жазық параллельді электродты разрядты камералар іс жүзінде сәйкес келеді. Бұл жағдайда электродтың беткі кедергісі кезінде $R_{эл.} = 25 \text{ кОм}$ ең аз мәні кернеу жану барьерлік разрядтың кедергісі байқалады.

4.18 - суретте электродтардың әртүрлі кедергісі кезінде разряд камерасындағы кернеудің қолданыстағы мәніне үздіксіз жазықтық параллель электродтары бар озонатор камерасының шығысындағы озон концентрациясының графигі көрсетілген. Өлшенетін кернеудің максималды мәні 10 кВ мәнімен шектеледі. Өлшенетін кернеудің минималды мәні озон концентрациясы $2,0 \text{ г/м}^3$ өлшеу диапазонының төменгі шегімен шектеледі.



1— $x_{1oz} = f(U_2)R_{эл.} \approx 0,1 \text{ Ом}$ кезінде; 2 — $x_{2oz} = f(U_2)R_{эл.} = 2,5 \text{ кОм}$ кезінде; 3 — $x_{3oz} = f(U_2)R_{эл.} = 6,5 \text{ кОм}$ кезінде; 4 — $x_{4oz} = f(U_2)R_{эл.} = 25 \text{ кОм}$ кезінде.

Сурет 4.18 – Озонатор камерасынан шығатын озон концентрациясының камераның үздіксіз жазық параллель электродтарындағы кернеудің қолданыстағы мәніне тәуелділігі:

4.18 - суреттің тәуелділіктерінен кернеудің жоғарылауымен өнімділік жоғарылайтынын көруге болады. Бұл жағдайда разрядты озонатор камерасының электродтарының оңтайлы беттік кедергісі бар $R_{эл.} = 6,5$ кОм (4.18-суреттегі 3-түзу), онда белгілі бір кернеу деңгейіндегі озонатор камераларын салыстыра отырып, шығуда озонның максималды концентрациясы байқалады.

4.3.1 Тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерін секцияланған электродпен эксперименттік зерттеу және салыстыру

4.4 - кестеде секцияланған электродты разряд камерасының эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген (33-суретті қараңыз) қосымша қосылған кедергісіз разряд тізбегінің әдеттегі параметрлерімен. Салқындату мәжбүрлі ауамен жүргізіледі. Осылайша, эксперименттік деректер разряд қуаты өзгерген кезде инерциясы төмен және тұрақты жылу режиміне шығу уақыты аз жылу режимінде тіркелді.

Кесте 4.4 – Қосымша кедергісіз разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері. ($R_{к.к} = 0$).

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{орт.}$, мА	0,4	1,2	2,0	2,0	2,8	3,6	4,8	6,0	7,2	8,0	9,2	10,0
P_w , Вт	-	-	2,0	4,0	6,0	12	18	24	34	40	50	60
$P_{оз}$, Вт	-	-	2,0	3,0	5,0	11	16	22	31	37	46	56
$\chi_{оз}$, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,5	4,0	5,2	5,9	6,4	6,8	6,9
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.5 - 4.8 кестелерде секцияланған электрод элементтерінің әрқайсысына тізбектей қосылған қосымша кедергісі бар разрядты озонатор камерасының эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген (4.4 - суретті қараңыз). Мәжбүрлі ауа салқындату жүргізіледі.

Кесте 4.5 – Қосымша кедергісі бар разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері $R_{к.к.} = 1,47$ кОм.

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{орт.}$, мА	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	3,6	4,8	5,6	6,8	7,6	8,4	9,2
P_w , Вт	-	-	-	2,0	4,0	10	14	22	28	34	42	50
$P_{оз}$, Вт	-	-	-	1,0	3,0	8,0	10	20	25	31	38	46
$\chi_{оз}$, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,8	4,5	5,8	6,8	7,3	7,7	7,9
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

Кесте 4.6 – Қосымша кедергісі бар разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері $R_{к.к.} = 3,0$ кОм.

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{орт.}$, мА	0,8	0,8	2,0	2,0	2,4	3,2	4,4	5,6	6,8	7,6	8,4	9,2
P_w , Вт	-	-	-	2,0	4,0	8,0	14	22	30	34	40	50
$P_{оз}$, Вт	-	-	-	1,0	3,0	6,0	12	20	27	31	36	46
$\chi_{оз}$, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,6	4,5	6,3	7,5	8,0	8,2	8,3
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

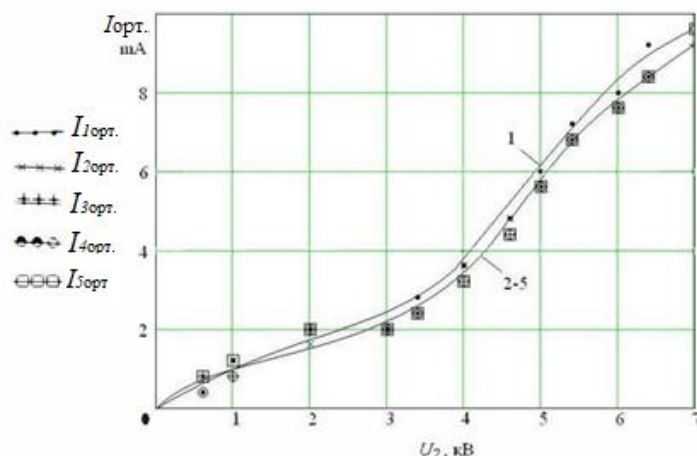
Кесте 4.7 – Қосымша кедергісі бар разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері $R_{к.к.} = 6,0$ кОм.

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{орт.}$, мА	0,4	0,8	2,0	2,0	2,4	3,2	4,4	5,6	6,8	7,6	8,4	9,6
P_w , Вт	-	-	-	2,0	4,0	8,0	14	22	30	36	44	52
$P_{оз}$, Вт	-	-	-	1,0	3,0	6,0	12	20	27	33	40	48
$\chi_{оз}$, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,6	4,5	6,4	7,4	7,8	8,0	8,0
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Кесте 4.8 – Қосымша кедергісі бар разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері $R_{к.к.} = 12$ кОм.

U_2 , кВ	0,6	1,0	2,0	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,4	6,0	6,4	7,0
$I_{орт.}$, мА	0,8	1,2	2,0	2,0	2,4	3,2	4,4	5,6	6,8	7,6	8,4	9,6
P_w , Вт	-	-	-	2,0	4,0	8,0	14	22	30	36	42	52
$P_{оз}$, Вт	-	-	-	1,0	3,0	6,0	12	20	27	33	38	48
$\chi_{оз}$, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,3	4,2	5,9	6,8	7,4	7,7	7,8
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1

4.4 – 4.8 кестелерде ұсынылған эксперименттік деректердің нәтижелері бойынша разрядты озонатор камерасы арқылы орташа токтың разряд камерасындағы кернеудің қолданыстағы мәніне тәуелділігі $I_{орт.}(U_2)$ (4.19 сурет) қосымша кедергінің әртүрлі мәндеріне құрылды.

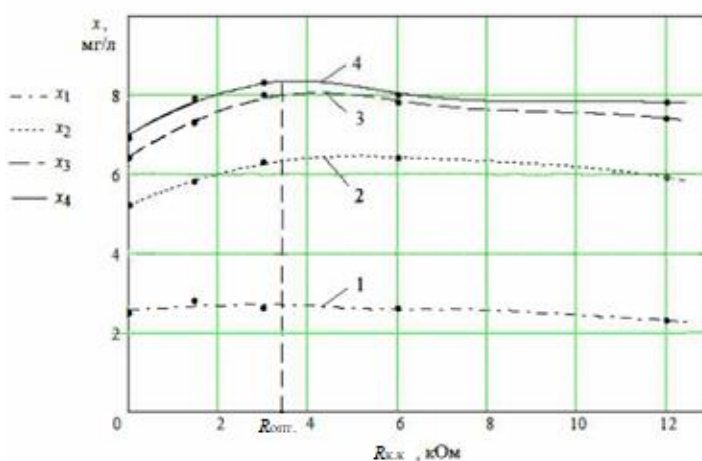


1 - $R_{к.к.} = 0$ кезінде; 2 - $R_{к.к.} = 1,47$ кОм кезінде; 3 - $R_{к.к.} = 3,0$ кОм кезінде;
4 - $R_{к.к.} = 6,0$ кОм кезінде; 5 - $R_{к.к.} = 12$ кОм кезінде.

Сурет 4.19 – Секцияланған электродты разряд камерасының вольтампер сипаттамалары:

4.19 - суреттен қосымша кедергіге байланысты секцияланған электроды бар разрядты озонатор камерасының вольт амперінің өнімділігі іс жүзінде сәйкес келетінін көруге болады.

4.20 - суретте секцияланған электроды бар разрядты озонатор камерасының шығысындағы озон концентрациясының разрядты озонатор камерасының электродтары арасындағы Әртүрлі жұмыс кернеулерінде тұрақты жұмыс режимі үшін $R_{к.к.}$ қосымша кедергі мәніне тәуелділігі көрсетілген.

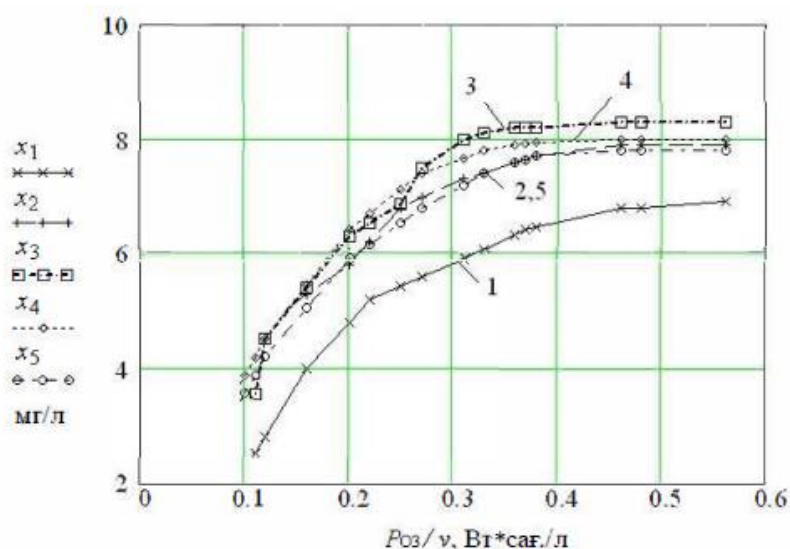


1 - $U_2 = 4,0$ кВ кезінде, 2 - $U_2 = 5,0$ кВ кезінде, 3 - $U_2 = 6,0$ кВ кезінде, 4 - $U_2 = 7,0$ кВ кезінде.

Сурет 4.20 – Секцияланған электроды бар озонатор камерасынан шығатын озон концентрациясының қосымша кедергіге тәуелділігі:

Разрядты озонаторлық камераның секцияланған электродының элементтеріне тізбектей қосылатын $R_{опт.}$ қосымша кедергісінің оңтайлы мәні байқалады, онда озонаторлық камераның шығысындағы озон концентрациясы берілген кернеу деңгейінде максималды болады. Бұл қосымша қарсылық мәні 2 - 4 кОм мәндер аймағында орналасқан.

4.21 - суретте электродтар тізбегіне қосылатын әр түрлі қосымша кедергісі бар секцияланған электроды бар разрядты озонатор камераларының зерттелетін конструкциялары үшін озон концентрациясының P/v факторына тәуелділігі көрсетілген. Ауа ағынының жылдамдығы мәні $v \approx 100$ л/сағ.



P/v : 1- $R_{к.к.} = 0$ кезінде; 2- $R_{к.к.} = 1,47$ кОм кезінде; 3 - $R_{к.к.} = 3,0$ кОм кезінде, 4- $R_{к.к.} = 6,0$ кОм кезінде, 5 - $R_{к.к.} = 12$ кОм кезінде.

Сурет 4.21 – Озон концентрациясының меншікті энергияға тәуелділігі

Меншікті энергия деп аталатын $P_{оз}/v$, Вт·ч/л, шамасы белсенді қуаттың өте үлкен емес мәндеріндегі озон концентрациясының разряд қуатына тәуелділігін жақсы сипаттайды және озонның k_0 түзілуінің және k_1 ыдырауының энергетикалық тұрақтыларымен бірге тосқауыл разрядындағы озон түзілуінің кинетикалық теңдеуіне (1) кіреді (4.30-бетті қараңыз).

$$k_0 = \frac{x_{O_3} v}{[x_{O_2}]_0 P_{O_3}}, \text{ л/Вт} \cdot \text{сағ}, \quad (4.7)$$

мұндағы $[x_{O_2}]_0 = 283,6$ мг/л - разрядты озонатор камерасының кіреберісіндегі ауадағы оттегінің бастапқы концентрациясы.

(4.7) формуласы P/v , факторының шамалы мәндерінде жарамды болғандықтан, $P_{оз}/v = 0,11$ Вт·сағ/л мәнінде әртүрлі қосымша кедергісі бар

секцияланған электроды бар разрядтық озонаторлық камералар үшін k_0 озон түзілу константасының мәндерін анықтаймыз.

k_1 тұрақты мәні белгілі k_0 тұрақты мәндерінде және (4.8) формула бойынша $x_p = k_0 [x_{O_2}]_0 / k_1$ озон тепе-теңдік концентрациясында болады:

$$k_1 = \frac{k_0 [x_{O_2}]_0}{x_p}, \text{ л/Вт} \cdot \text{сағ}, \quad (4.8)$$

Разрядты озонатор камерасының секцияланған электродының элементтеріне қосылатын қосымша кедергінің әр түрлі мәні бар озон генерациялау жүйелері үшін x_p , мг/л, озонының тепе-теңдік концентрациясының мәндері, сондай-ақ тепе-теңдік концентрациясынан аспайтын озон концентрациясының мәндері үшін k_0 және k_1 тұрақтыларының мәндері 4.9-кестеде келтірілген.

Кесте 4.9 – x_p , k_1 және k_0 мәндері $x_{O_3} < x_p$ әр түрлі қосымша кедергі мәндерінде секцияланған электродты разрядты камералар үшін.

$R_{к,к}$ КОМ	0	1,47	3,0	6,0	12
x_p , мг/л	6,9	7,9	8,3	8,0	7,8
k_0 , л/Вт*сағ	0,08	0,15	0,13	0,13	0,12
k_1 , л/Вт*сағ	3,29	5,33	4,60	4,77	4,55

4.8 - кестеде келтірілген есептелген тұрақтылардың мәндері меншікті энергия факторының мәні үшін алынады $P_{O_3}/v = 0,11$ Вт·сағ/л. меншікті энергия факторының үлкен мәндерінде (4.124) және (4.125) формулалар бойынша k_0 озонының түзілуінің және k_1 озонының ыдырауының энергетикалық константаларын анықтау әділ болмайды, өйткені бұл формулалардың жоғарыда көрсетілген шектеулі қолданылуы бар. Сондықтан $x_{1O_3} = f(P_{O_3}/v)$ графикалық тәуелділіктерін қарастыру және талдау толық көрініс береді (4.21-суретті қараңыз) есептелген тұрақты мәндерді талдаумен қатар (4.9 - ші кестені қараңыз).

Осы диссертацияда бұрын баяндалған нәтижелермен бірлесіп қарау кезінде алынған соңғы нәтижелерді келесідей түсіндіруге болады:

1) микро разряд тізбегінің белсенді кедергісінің артуы амплитудасы аз электр импульсінің ұзақтығымен күшейтілген апериодтық режимде микро разрядтың өтуіне әкеледі (4.90-бетті қараңыз);

2) қарсылықтың өсуімен жекелеген микро разрядтардың ұзақтығы артады, бұл ретте уақыт бойынша бірнеше микро разрядтардың импульстарының бөлінуінің біркелкілігі артады (4.92-бетті қараңыз);

3) микро разрядтардың біртектілігінің жоғарылауы озонның түзілуінің де, ыдырауының да энергетикалық тұрақтыларының жоғарылауына әкеледі (4.9-кестені қараңыз), бұл электр разряды процесінің қарқындылығының жоғарылауынан туындайды, нәтижесінде пайда болған озонның

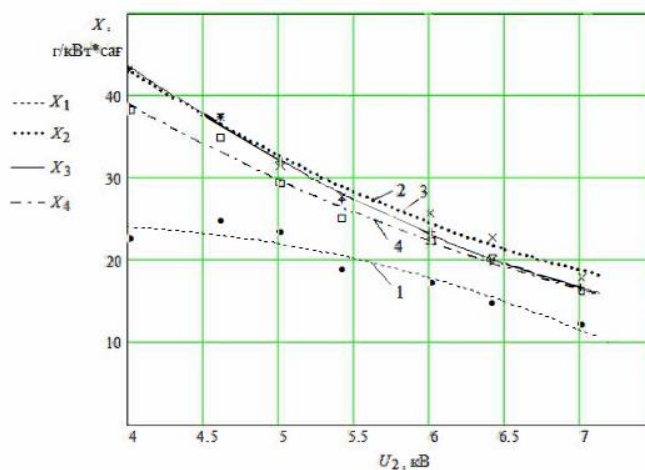
жоғарылауының әсері температураның жоғарылауынан туындаған және озонның ыдырауына әкелетін әсерден басым болады (4.9 -ші кестені қараңыз).

4.22 - суретте $R_{к.к.}$ кедергісінің әртүрлі мәндеріндегі озонатордағы кернеуден x_{1O_3} , г/кВт·сағ озон синтезінің энергия тиімділігі көрсеткішінің тәуелділігі көрсетілген. разрядты озонатор камерасының секцияланған электродына қосылған резисторлар.

Озон синтезінің энергия тиімділігі көрсеткішінің мәні x_{1O_3} , г/кВт·сағ разряд камерасынан шығатын озон концентрациясының мәнін (4.126) өрнегіне сәйкес тұтынылатын белсенді қуаттың мәніне бөлу нәтижесінде алынды:

$$X_{O_3} = x_{O_3} V / P_{O_3} = 100 \cdot x_{O_3} / P_{O_3}, \text{ г/кВт} \cdot \text{сағ}. \quad (4.9)$$

4.22 - суреттен тосқауыл разряды камерасының секцияланған электрод элементіне қосылған қосымша кедергінің жоғарылауымен озон электросинтезінің энергия тиімділігі арта түсетінін көруге болады. Сондай-ақ, белсенді қосымша кедергінің жоғарылауымен озон синтезінің энергия тиімділігінің максимумы төменгі кернеулер аймағына ауысады.



1 – $R = 0$ кезінде ; 2 - $R_{к.к.} = 3,0$ кОм кезінде, 3 - $R_{к.к.} = 6,0$ кОм кезінде, 4 - $R_{к.к.} = 12$ кОм кезінде.

Сурет 4.22 – Озон синтезінің энергия тиімділігі көрсеткішінің кернеуге тәуелділігі:

Максималды энергия тиімділігі $R_{к.к.} = 1 - 10$ кОм. реттік қосымша кедергілер мәнімен байқалады. Бұл жағдайда $R_{к.к.} = 3 - 6$ кОм қосымша кедергінің мәні кезінде энергия тиімділігінің максимумы разряд камерасындағы кернеудің ең төменгі деңгейінде көрінеді.

Әр түрлі қосымша кедергісі бар секцияланған электродты разряд камерасына арналған салыстырмалы эксперименттердің келесі тобы мәжбүрлі

салқындату болмаған кезде жүргізілді. Осылайша, тұрақты температура деңгейі анағұрлым маңызды болды, бұл эксперименттік салыстыруға ыңғайлы.

4.10 - кестеде қосымша қосылған кедергісіз разряд тізбегінің әдеттегі параметрлері бар секцияланған электродты разряд камерасының эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген. Салқындату табиғи ауамен жүргізіледі.

Кесте 4.10 – Қосымша кедергісіз разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері, $R_{қ.к.} = 0$.

U_2 , кВ	2,4	3,0	3,6	4,0	4,6	5,0	5,6	6,0	6,4
$I_{орт.}$, мА	2,0	2,0	2,2	3,2	4,4	6,8	8,0	8,8	9,6
P_w , Вт	1,0	2,0	4,0	9,0	20	35	51	57	67
$P_{оз}$, Вт	1,0	1,0	3,0	7,0	18	33	48	54	63
хоз, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,2	2,6	2,9	3,1
ΔT , °С	0	0	0	0	0	1	2	4	5

4.11 - 4.13 кестелерде секцияланған электроды бар разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері келтірілген бөлінген электрод элементтерінің әрқайсысына тізбектей қосылған қосымша кедергілер. Салқындату табиғи ауамен жүргізіледі.

Кесте 4.11 – Қосымша кедергісі бар разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері $R_{қ.к.} = 12$ кОм.

U_2 , кВ	2,4	3,0	3,6	4,0	4,6	5,0	5,6	6,0	6,4
$I_{орт.}$, мА	2,0	2,0	2,2	3,2	4,4	6,0	7,6	8,8	10,0
P_w , Вт	1,0	2,0	4,0	9,0	18	30	44	58	70
$P_{оз}$, Вт	1,0	1,0	3,0	7,0	16	28	41	55	66
хоз, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,0	2,6	3,0	3,1
ΔT , °С	0	0	0	0	0	0	1	2	3

Кесте 4.12 – Қосымша кедергісі бар разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері $R_{қ.к.} = 24$ кОм.

U_2 , кВ	2,4	3,0	3,6	4,0	4,6	5,0	5,6	6,0	6,4
$I_{орт.}$, мА	2,0	2,0	2,4	3,2	5,2	6,8	8,0	8,8	10,0
P_w , Вт	1,0	2,0	4,0	9,0	20	35	47	58	68
$P_{оз}$, Вт	1,0	1,0	3,0	7,0	18	33	44	55	64
хоз, мг/л	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,1	2,5	2,8	3,0
ΔT , °С	0	0	0	0	1	2	3	4	5

Кесте 4.13 – Қосымша кедергісі бар разрядты озонатор камерасын эксперименттік зерттеу нәтижелері $R_{қ.к.} = 6$ кОм.

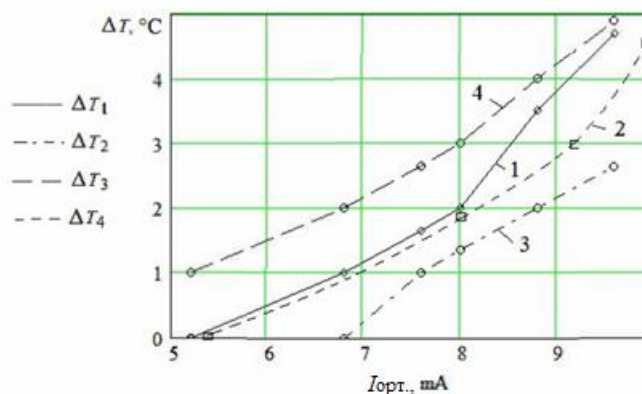
$I_{орт.}$, мА	5,2	8,0	9,2	10
ΔT , °С	0	2	3	4,5

Ескерту: озон электросинтезінің электродтардың кедергісіне температуралық тәуелділігін нақтылауға арналған қосымша эксперимент, температура DT-838 сандық мультиметрімен К типті термопарамен өлшенді.

Тәжірибелер барысында қоршаған ортаның температурасы T_0 және разрядты озонатор камерасынан шығатын озон бар газдың температурасы $T_{\text{шығ.}}$ өлшенді. Разряд ағыны нәтижесінде газдың қызуы озон бар газдың және қоршаған ортаның температуралық айырмашылығы бойынша бағаланды:

$$\Delta T = T_{\text{шығ.}} - T_0. \quad (4.10)$$

4.23 - суретте секцияланған электроды бар разрядты озонатор камерасынан шығатын озон бар газды қыздырудың секцияланған электрод элементімен тізбектей қосылатын қосымша кедергінің әр түрлі мәндеріндегі ағып жатқан токқа тәуелділігі көрсетілген. Өлшеу тұрақты жылу режимінде жүргізілді.



- 1 - $T = f(I_{\text{орт.}})$ $R_{\text{к.к.}} = 0$ кезінде,
 2 - $T = f(I_{\text{орт.}})$ $R_{\text{к.к.}} = 6 \text{ кОм}$ кезінде, 3 - $T = f(I_{\text{орт.}})$ $R_{\text{к.к.}} = 12 \text{ кОм}$ кезінде, 4 - $T = f(I_{\text{орт.}})$ $R_{\text{к.к.}} = 24 \text{ кОм}$

Сурет 4.23 – Құрамында озон бар газды қыздырудың әр түрлі қосымша қарсылықтар кезінде разрядты озонатор камерасы арқылы орташа токқа тәуелділігі.

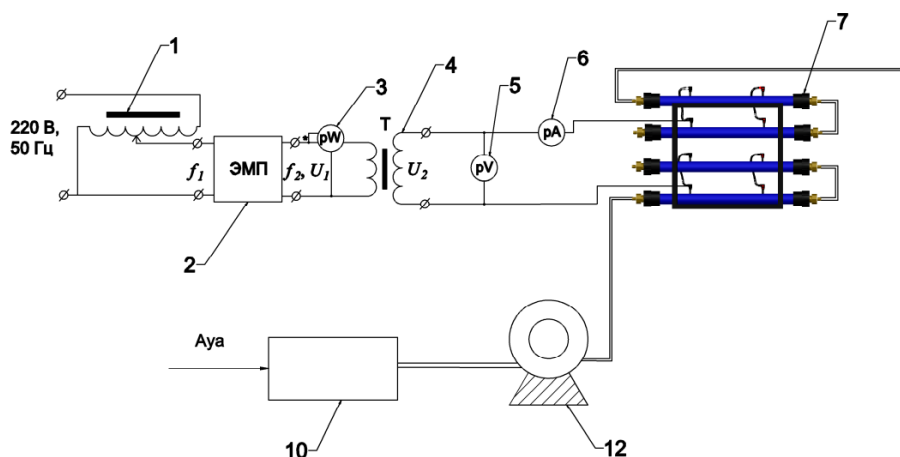
4.23-суреттен секцияланған электрод элементтеріне қосылған $R_{\text{к.к.}} = 12 \text{ кОм}$, қосымша кедергі мәні кезінде көруге болады. Секцияланған электродты озонатор камерасы, разряд камерасы арқылы өтетін токтың жылу әсері аз. Мұны жеке микро разрядтардың, сондай-ақ микро разрядтардың ток импульстарының амплитудасының төмендеуімен түсіндіруге болады (4.77, 4.90, 4.92-беттерді қараңыз).

Бұл ретте микро разрядтың дамуының екінші сатысында микро разрядтың заряд процесінің уақытын ұлғайту есебінен микро разрядпен тасымалданатын

зарядтың уақытында қайта бөлу, сондай-ақ осы диссертацияның екінші тарауында қарастырылған электр тізбектері теориясының заңдарына сәйкес микро разряд арнасының кедергісі мен микро разряд тізбегіне қосылған қосымша кедергі арасындағы жылу бөлуді қайта бөлу орын алады.

4.3.2 Ауа ылғалдылығының ауытқуының эксперимент нәтижелеріне әсерін анықтау

Озон түзетін газ ылғалдылығының ауытқуы сияқты фактордың эксперименттерге әсер ету дәрежесін анықтау үшін қосымша зерттеулер жүргізілді. Эксперименттік қондырғының көмегімен (4.24-сурет) ауаның салыстырмалы ылғалдылығының тербелістерінің (40%-дан 57%-ға дейін) жоғары омдық электродтары бар тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерінің электр энергетикалық параметрлеріне әсерін зерттеу жүргізілді (вольтамперлік сипаттама, қуат тұтыну).



1 - автотрансформатор; 2 - электромеханикалық түрлендіргіш ($h = 400$ Гц); 3 - ваттметр; 4 - бір фазалы трансформатор $U_{нн} 100$ В, $U_{вн} = 10000$ В, $S = 640$ В·А; 5 - киловольтметр; 6 - миллиамперметр; 7 - разрядты озонатор камерасы; 10 - ауа компрессоры; 12- ауаны кептіру блогы

Сурет 4.24 – Ылғалдылық ауытқуларының тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерінің электр энергетикалық сипаттамаларына әсерін зерттеуге арналған эксперименттік қондырғы

4.24-суретте көрсетілген эксперименттік қондырғы бұрын қолданылғаннан өзгеше (4.16-суретті қараңыз) құрамында силикагель түйіршіктерімен толтырылған ағынды-сору камерасы болып табылатын ауаны кептіру блогы бар (4.24-суретте 12). Силикагель түйіршіктерінің диаметрі (2-3 мм) кептіру блогы арқылы ауаның кедергісіз өтуі үшін жеткілікті үлкен.

Сондай-ақ, бұрын қолданылған эксперименттік қондырғыдан айырмашылығы, қуатты өлшеу үшін тұтынылатын белсенді және реактивті

қуатты (8 Вт/ 8 ВАр бастап) өлшеуге мүмкіндік беретін ЩВ72.1 сандық қуат өлшегіші (№64916-16 Мемлекеттік тізілім) пайдаланылды.

Осы салыстырмалы эксперименттерді жүргізу кезінде секцияланған электродты конструкциясы бар разрядты камера (4.24-суретте 7) пайдаланылды (4.18- суретті қараңыз.).

4.14-кестеде секцияланған электрод элементтерінің әрқайсысына тізбектей қосылған әр түрлі қосымша қарсылық кезінде ағызылатын және құрғатылмайтын разряд камерасындағы орташа токтың кернеуге тәуелділігі туралы мәліметтер келтірілген.

Кесте 4.14 – Әр түрлі қосымша кедергісі бар разряд камерасындағы кенеуге токтың тәуелділігі.

U, кВ		Юрт., мА												
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
R _д =0	ос.	0,8	1,2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,6	6,8	8,0	8,8	9,6
	б/о*	0,8	1,2	1,6	1,6	1,6	2,0	2,4	3,2	5,2	6,8	7,6	8,4	9,2
1,47 кОм	ос.	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,2	7,2	8,0	8,8	9,6
	б/о*	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,4	5,6	7,4	8,0	8,8	9,6
3 кОм	ос.	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,6	6,8	8,0	8,8	9,6
	б/о*	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,6	7,2	8,0	8,8	10,0
6 кОм	ос.	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,2	7,2	8,0	8,8	9,6
	б/о*	0,8	1,2	1,6	2,0	2,0	2,0	2,8	4,0	5,2	6,8	8,0	8,8	9,6
12 кОм	ос.	0,8	1,2	1,6	1,6	1,8	2,0	2,4	3,6	4,8	6,8	7,6	8,4	9,2
	б/о*	0,8	1,2	1,6	1,6	1,6	2,0	2,4	3,2	5,2	6,4	7,6	8,4	9,2

Ескертпелер

1 Мәндер ауамен кептірумен (ос.) және ауамен кептірусіз (б/о) өлшенді.

2 $R_d = 0(*)$ кезінде б/о экспериментін жүргізу кезінде ауаның салыстырмалы ылғалдылығы 50 % құрайды.

4.14 - кестеге сәйкес, озон түзетін ауаның ылғалдылығының өзгеруі нәтижесінде разряд камерасындағы өлшенген орташа токтың тербелісінің орташа мәнін бағалаймыз.

Қосымша кедергі болмаған кезде өлшенген $\delta_I 0, \%$, тогының орташа салыстырмалы тербелісі ($R_d = 0$):

$$\delta_{I0} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8 - 0,8}{0,8} + \frac{1,2 - 1,2}{1,2} + \frac{2 - 1,6}{1,6} + \frac{2 - 1,6}{1,6} + \frac{2 - 1,6}{1,6} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2,8 - 2,4}{2,4} \right. \\ \left. + \frac{4 - 3,2}{3,2} + \frac{5,6 - 5,2}{5,2} + \frac{6,8 - 6,8}{6,8} + \frac{8 - 7,6}{7,6} + \frac{8,8 - 8,4}{8,4} + \frac{9,6 - 9,2}{9,2} \right) \\ \cdot 100\% = \pm 10,7\% .$$

Қосымша кедергі $R_d = 1,47$ кОм мәні кезінде, өлшенген токтың орташа салыстырмалы тербелісі $\delta_{I 1,47}$, %:

$$\delta_{I1,47} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8 - 0,8}{0,8} + \frac{1,2 - 1,2}{1,2} + \frac{1,6 - 1,6}{1,6} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2 - 2}{2} \right. \\ \left. + \frac{2,8 - 2,8}{2,8} + \frac{4,4 - 4,0}{4,0} + \frac{5,6 - 5,2}{5,2} + \frac{7,4 - 7,2}{7,2} + \frac{8 - 8}{8} + \frac{8,8 - 8,8}{8,8} \right. \\ \left. + \frac{9,6 - 9,6}{9,6} \right) \cdot 100\% = \pm 1,6\% .$$

Қосымша кедергі ($R_d = 3,0$ кОм) мәні кезінде, өлшенген токтың орташа салыстырмалы тербелісі $\delta_{I 3,0}$, %:

$$\delta_{I3,0} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8 - 0,8}{0,8} + \frac{1,2 - 1,2}{1,2} + \frac{1,6 - 1,6}{1,6} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2,8 - 2,8}{2,8} \right. \\ \left. + \frac{4,0 - 4,0}{4,0} + \frac{5,6 - 5,6}{5,2} + \frac{7,2 - 6,8}{6,8} + \frac{8 - 8}{8} + \frac{8,8 - 8,8}{8,8} + \frac{10 - 9,6}{9,6} \right) \\ \cdot 100\% = 0,8\% .$$

Қосымша кедергі ($R_d = 6,0$ кОм) мәні кезінде, өлшенген токтың орташа салыстырмалы тербелісі $\delta_{I 6,0}$, %:

$$\delta_{I6,0} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8 - 0,8}{0,8} + \frac{1,2 - 1,2}{1,2} + \frac{1,6 - 1,6}{1,6} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2 - 2}{2} + \frac{2,8 - 2,8}{2,8} \right. \\ \left. + \frac{4,0 - 4,0}{4,0} + \frac{5,2 - 5,2}{5,2} + \frac{7,2 - 6,8}{6,8} + \frac{8 - 8}{8} + \frac{8,8 - 8,8}{8,8} + \frac{9,6 - 9,6}{9,6} \right) \\ \cdot 100\% = 0,5\% .$$

Қосымша кедергі ($R_d = 12,0$ кОм) мәні кезінде, өлшенген токтың орташа салыстырмалы тербелісі $\delta_{I 12,0}$, %:

$$\delta_{I12,0} = \frac{1}{13} \left(\frac{0,8 - 0,8}{0,8} + \frac{1,2 - 1,2}{1,2} + \frac{1,6 - 1,6}{1,6} + \frac{1,6 - 1,6}{1,6} + \frac{1,8 - 1,6}{1,6} + \frac{2 - 2}{2} \right. \\ \left. + \frac{2,4 - 2,4}{2,4} + \frac{3,6 - 3,2}{3,2} + \frac{5,2 - 4,8}{4,8} + \frac{6,8 - 6,4}{6,4} + \frac{7,6 - 7,6}{7,6} \right. \\ \left. + \frac{8,4 - 8,4}{8,4} + \frac{9,2 - 9,2}{9,2} \right) \cdot 10 = 3\% .$$

Озон түзетін ауаның ылғалдылығының өзгеруінен разрядты озонатор камерасындағы ток мәндеріне, демек, синтезделген озон мөлшеріне өлшеу құралының (СИ) жүйелік негізгі қателігінің және жүйелік қателіктің бірлескен әсерін бағалайық.

Ағымдағы өлшеу диапазонының жоғарғы шегіне келтірілген 2,5 дәлдік класының Ц423021 миллиамметрiнiң (СИ) негізгі қателігі $\gamma_{\text{СИ}} = \pm 2,5 \%$. Бірінші жуықтауда келтірілген (СИ) қателігін шамамен (СИ) салыстырмалы қателігіне теңестіреміз: $\delta_{\text{СИ}} \approx \gamma_{\text{СИ}} = \pm 2,5 \%$.

Кесте 4.15 – Белсенді және реактивті қуаттың разряд камерасындағы кернеуге әр түрлі қосымша қарсылық кезінде тәуелділігі.

		P, Вт / Q, В Ар					
U, кВ		4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
R _l =0	ос.	8/8	14/15	18/18	24/21	27/26	32/31
	б/о*	-	14/13	20/19	24/23	27/27	32/32
1,47 кОм	ос.	10/10	13/12	20/21	24/24	28/27	33/32
	б/о*	10/10	15/14	21/20	24/22	28/25	31/30
3 кОм	ос.	10/9	14/13	20/18	23/23	27/27	32/31
	б/о*	10/9	14/12	20/19	25/24	27/29	33/32
6 кОм	ос.	10/9	13/14	21/20	24/23	27/26	34/31
	б/о*	10/9	13/14	20/20	23/25	27/26	33/31
12 кОм	ос.	8/9	13/14	19/19	22/24	26/26	31/31
	б/о*	8/8	13/14	19/18	22/23	28/28	31/31

Токты өлшеу қателігінің жүйелі компоненттерін және олардың арасындағы кейінгі салыстыруды өзара тәуелсіз деп санауға болады. Содан кейін біз разрядты озонатор камерасындағы токты өлшеудің және салыстырудың жалпы қателігін үш компоненттің жиынтығымен анықтаймыз: негізгі қателік СИ $\delta_{\text{СИ}} \approx \gamma_{\text{СИ}} = \pm 2,5 \%$, қосымша кедергі болмаған кезде эксперименттердегі ылғалдылықтың өзгеруінен болатын қателіктер $\delta_{I 0} = \pm 10,7 \%$, 3 кОм қосымша кедергісі бар эксперименттердегі ылғалдылықтың өзгеруінен болатын қателіктер $\delta_{I 3,0} = \pm 0,8 \%$. Ағымдағы өлшеу мен салыстырудың жалпы салыстырмалы қателігін [97] (4.12) формула бойынша анықтауға болады:

$$\delta_{\Sigma} = K_p \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}, \%, \quad (4.11)$$

мұндағы $K_p = 0,95$ - қабылданған сенімділік коэффициенті 0,9.

$$\text{Сонда : } \delta_{\Sigma} = 0,95 \cdot \sqrt{2,5^2 + 10,7^2 + 0,8^2} = 10,5 \% .$$

4.15 - кестеде разрядтың тұтынылатын белсенді және реактивті қуатының разряд камерасындағы кернеуге секцияланған электрод элементтерінің әрқайсысына тізбектей қосылған әр түрлі қосымша қарсылық кезінде құрғатылатын және құрғатылмайтын тәуелділігі туралы мәліметтер келтірілген.

4.15 - кестеден тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерінің қуат коэффициентінің мәні разрядқа енгізілген белсендіге байланысты емес екенін көруге болады және шамамен $\cos \varphi \approx 1/\sqrt{2} \approx 0,7$ құрайды.

4.15 - кестеге сәйкес озон түзетін ауаның ылғалдылығының өзгеруі нәтижесінде разряд камерасындағы өлшенген белсенді және реактивті қуаттың тербелісінің орташа мәнін бағалаймыз.

Өлшенген белсенді қуаттың орташа тербелісі ΔP_0 , %, және өлшенген реактивті қуаттың ΔQ_0 , %, қосымша кедергі болмаған кезде ($R_d = 0$):

$$\Delta P_0 = \frac{1}{5} \left(\frac{14 - 14}{14} + \frac{20 - 18}{18} + \frac{24 - 24}{24} + \frac{27 - 27}{27} + \frac{32 - 32}{32} \right) \cdot 100\% \\ = \pm 2,2 \% ;$$

$$\Delta Q_0 = \frac{1}{5} \left(\frac{15 - 13}{13} + \frac{19 - 18}{18} + \frac{23 - 21}{21} + \frac{27 - 26}{26} + \frac{32 - 31}{31} \right) \cdot 100\% \\ = \pm 7,5 \% .$$

Өлшенген белсенді қуаттың орташа тербелісі ΔP_0 , %, және өлшенген реактивті қуаттың ΔQ_0 , %, қосымша кедергі ($R_d = 1,47$ кОм): болмаған кезде:

$$\Delta P_{1,47} = \frac{1}{6} \left(\frac{10 - 10}{10} + \frac{15 - 13}{13} + \frac{21 - 20}{20} + \frac{24 - 24}{24} + \frac{28 - 28}{28} + \frac{33 - 31}{31} \right) \\ \cdot 100\% = \pm 4,5 \% ;$$

$$\Delta Q_{1,47} = \frac{1}{6} \left(\frac{10 - 10}{10} + \frac{14 - 12}{12} + \frac{21 - 20}{20} + \frac{24 - 22}{22} + \frac{27 - 25}{25} + \frac{32 - 30}{30} \right) \\ \cdot 100\% = \pm 7,6 \% .$$

Өлшенген белсенді қуаттың орташа тербелісі ΔP_0 , %, және өлшенген реактивті қуаттың ΔQ_0 , %, қосымша кедергі ($R_d = 3,0$ кОм): болмаған кезде:

$$\Delta P_{3,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{10 - 10}{10} + \frac{14 - 14}{14} + \frac{20 - 20}{20} + \frac{25 - 23}{23} + \frac{27 - 27}{27} + \frac{33 - 32}{32} \right) \\ \cdot 100\% = \pm 2,0 \% ;$$

$$\Delta Q_{3,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{9-9}{9} + \frac{13-12}{12} + \frac{19-18}{18} + \frac{24-23}{23} + \frac{29-27}{27} + \frac{32-31}{31} \right) \cdot 100\% \\ = \pm 4,8 \%$$

Өлшенген белсенді қуаттың орташа тербелісі ΔP_0 , %, және өлшенген реактивті қуаттың ΔQ_0 , %, қосымша кедергі ($R_d = 6$ кОм): болмаған кезде:

$$\Delta P_{6,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{10-10}{10} + \frac{13-13}{13} + \frac{21-20}{20} + \frac{24-23}{23} + \frac{27-27}{27} + \frac{34-33}{33} \right) \cdot 100\% \\ = \pm 2,1 \%$$

$$\Delta Q_{6,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{9-9}{9} + \frac{14-14}{14} + \frac{20-20}{20} + \frac{25-23}{23} + \frac{29-26}{26} + \frac{31-31}{31} \right) \cdot 100\% \\ = \pm 3,4 \%$$

Өлшенген белсенді қуаттың орташа тербелісі ΔP_0 , %, және өлшенген реактивті қуаттың ΔQ_0 , %, қосымша кедергі ($R_d = 12,0$ кОм): болмаған кезде:

$$\Delta P_{12,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{8-8}{8} + \frac{13-13}{13} + \frac{19-19}{19} + \frac{23-22}{22} + \frac{28-26}{26} + \frac{31-31}{31} \right) \cdot 100\% \\ = \pm 2,0 \%$$

$$\Delta Q_{12,0} = \frac{1}{6} \left(\frac{9-8}{8} + \frac{14-14}{14} + \frac{19-18}{18} + \frac{24-23}{23} + \frac{28-26}{26} + \frac{31-31}{31} \right) \cdot 100\% \\ = \pm 5,0 \%$$

ЩВ72.1 қуат өлшегішінен алынған сандық өлшеу құралының келтірілген негізгі қателігі $\gamma_{сн} = \pm 0,5 \%$ құрайды. Бірінші жуықтауда келтірілген СИ қатесін шамамен СИ салыстырмалы қателігіне тең деп қабылдаймыз: $\delta_{сн} \approx \gamma_{сн} = \pm 0,5 \%$.

Разрядты озонатор камерасындағы белсенді және реактивті қуатты өлшеу мен салыстырудың жиынтық қателігін үш құрамдас бөліктің жиынтығымен анықтаймыз: негізгі қателік СИ $\delta_{сн} \approx \gamma_{сн} = \pm 0,5 \%$, қосымша кедергі болмаған кезде эксперименттердегі ылғалдылықтың өзгеруінен болатын қателіктер $\delta_{P_0} = \pm 2,2 \%$ және $\delta_{Q_0} = \pm 7,5 \%$, қосымша кедергісі 3 кОм $\delta_{3_0} = \pm 2,0 \%$ және $\delta_{Q_{3,0}} = \pm 4,8 \%$, болатын эксперименттердегі ылғалдылықтың өзгеруінен болатын қателер. Активті және реактивті қуатты өлшеу мен салыстырудың жалпы жүйелі салыстырмалы қателігі (4.12) формулаға сәйкес анықталады:

$$\delta_{Q\Sigma} = 0,95 \cdot \sqrt{0,5^2 + 2,2^2 + 2,0^2} = 2,9 \%$$

$$\delta_{Q\Sigma} = 0,95 \cdot \sqrt{0,5^2 + 7,5^2 + 4,8^2} = 8,5 \% .$$

Әртүрлі электродтар кедергісі бар бөгеттік разрядтағы озонды генерациялау жүйелерінің электр қуатының параметрлеріне тәжірибелік зерттеулер жүргізу кезінде разрядтық озонатор камераларының электродаралық сыйымдылығы ($C_{эл}$) және диэлектрлік жоғалту тангенсі ($tg\delta$) өлшенді. Бұл өлшемдер сандық E7-8 RLC өлшегіші арқылы жүргізілді.

Секциялық электродтың элементтеріне қосылған кедергінің мәні 0-ден 24 кОм-ға дейін өзгерген кезде зерттелетін разрядтың озонатор камерасының электродаралық сыйымдылығының ($C_{эл} = 215 - 260$ пФ) және диэлектриктің мәнінің шамалы ауытқуы. жоғалту тангенсі ($tg \delta = 0,017 - 0,03$) байқалды. Өлшенген параметрлер (4.12) формуласына сәйкес $h = 400$ Гц ток жиілігіндегі электродтар арасындағы кернеуге байланысты жоғары омдық электродтары бар тосқауыл разрядындағы зерттелетін озон генерациялау жүйелеріндегі диэлектрлік шығынды (P_d) бағалауға мүмкіндік береді.

$$P_d = 2\pi f U_2^2 C_{эл} tg\delta = 800\pi U_2^2 C_{эл} tg\delta , \text{ Вт.} \quad (4.12)$$

4.16 - кестеде жоғары омдық электродтары бар разряд камерасындағы диэлектрлік шығындардың электродтар арасындағы кернеуге тәуелділігі көрсетілген, олар эксперименттерде қолданылатын кернеулер диапазонында ең жиі байқалатын өлшенген сыйымдылық мәндері ($C_{эл} = 230$ пФ) және жоғалту бұрышының тангенсі ($tg\delta = 0,02$) үшін ұсынылған.

Кесте 4.16 – Шығыс кернеуінің зерттелетін диапазонында жоғары омды электродтары бар биттік камерадағы диэлектрлік шығындар.

$U_2, \text{ кВ}$	2	4	6	8	10	12	14
$P_d, \text{ Вт}$	0,12	0,17	0,15	0,28	0,33	0,45	0,75

4.16 - кестеде көрсетілген шығыс кернеуінің зерттелетін диапазонындағы диэлектрлік шығындардың мәндері бұл шығындардың аздығын көрсетеді, сондықтан диэлектрлік шығындардың озон генерациялау жүйелеріндегі жалпы белсенді қуатқа әсері жоғары тосқауыл электродтарымен ескерілмеуі мүмкін.

4.4 Тәжі разрядқа негізделген озонатордын су тазалау үрдісіндегі экологиялық тиімділігін зерттеу

Өнеркәсіптік сарқынды суларды тазарту қазіргі заманғы негізгі экологиялық мәселелердің бірі болып табылады. Сарқынды сулардың химиялық ластануы ең көп тараған, олар органикалық (фенолдар, нафтен қышқылдары, пестицидтер және т.б.) және бейорганикалық (тұздар, қышқылдар, сілтілер), улы (мышьяк, сынап қосылыстары, қорғасын, кадмий және т.б.) және улы емес болуы мүмкін [4]. Ал бактериялық ластану суда патогенді бактериялардың, вирустардың (700 түрге дейін), саңырауқұлақтардың және т.б. пайда болуымен

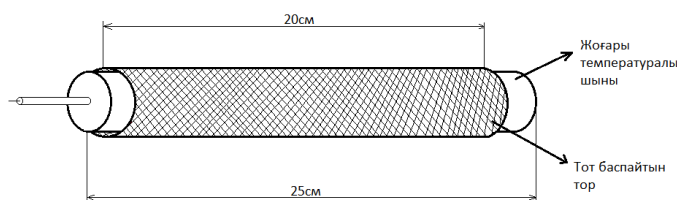
көрінеді. Механикалық ластану суға әртүрлі механикалық қоспалардың түсуімен сипатталады (күм, шлам, лай және т.б.). Механикалық қоспалар судың органолептикалық қасиеттерін айтарлықтай нашарлатуы мүмкін [7].

Өнеркәсіп табиғи ресурстардың көпшілігінің негізгі тұтынушысы және қоршаған ортаны негізгі ластаушы болып табылады [8]. Коммуналдық сарқынды сулар көп мөлшерде тұрғын үйлер мен қоғамдық ғимараттардан, кір жуатын орындардан, асханалардан, ауруханалардан және т.б. Сарқынды сулардың бұл түріне әртүрлі органикалық заттар, сондай - ақ бактериялық ластануды тудыруы мүмкін микроорганизмдер басым болады [5].

Пестицидтер, аммоний және нитрат азоты, фосфор, калий және т.б. сияқты қауіпті ластаушы заттардың үлкен мөлшері ауылшаруашылық аймақтарынан, соның ішінде мал шаруашылығы кешендері орналасқан аумақтардан шайылады. Көбінесе олар су қоймалары мен бұлақтарға ешқандай тазартусыз түседі, сондықтан органикалық заттардың, қоректік заттардың және басқа ластаушы заттардың жоғары концентрациясы бар [6].

Атмосферадан су беттеріне шөгетін газ - түтін қосылыстары (аэрозольдер, шаң және т.б.) айтарлықтай қауіп төндіреді. Табиғи сулардың мұнаймен ластануының ауқымы орасан зор [10]. Жыл сайын миллиондаған текше метр суды жағалаудағы мұнай кен орындары теңіз және тұщы су экожүйесін ластайды. Осындай ластанған сарқынды суларды электрлік разрядқа негізделген озонатор арқылы зиянды химиялық қосылыстарды жою үрдісін зерттеу мәселесін талқылайық.

Зерттеу жұмыстарын жүргізу үшін арнай Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінде тәжі разрядқа негізделген озонатордың су тазалау үрдісіндегі тиімділігін зерттеу мақсатында зертханалық макеті даярланды (сурет 4.25, 4.26, 4.27).



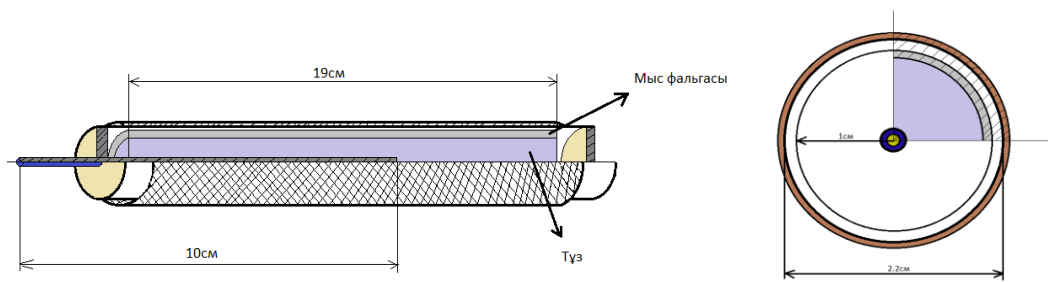
Сурет 4.25 - тәжі разряд тудырушының беттік көрінісі

Озонаторда кернеудің тесіп өтуі электр өрісінің белгілі бір мәнінде болады. Мұндай кернеуді шекті кернеу деп атайды және $E_{\text{шектік}}$ - деп белгілейді.

Жазық конденсатор жағдайында, онда өріс біркелкі бұзылады $E_{\text{шектік}}$ мәніне жеткенде және U_k - кернеуі пайда болады

$$U_k = a \cdot E_{\text{шектік}} \quad (4.13)$$

мұндағы, a - пластиналар арасындағы қашықтық.



а) озонатордын 4/1 бөлігі

б) үстіңгі көрінісі

Сурет 4.26 - тәжі разрядқа негізделген озонатор

Кез-келген тосқауыл разрядқа негізделген озонатор құрылғылары конденсатор режимінде жұмыс жасайды (сурет 4.26 б). Озонатор құрылымының негізгі ерекшелігі "цилиндр ішіндегі цилиндр" дизайны қарастырылды, бұл құрылымда өріс кернеуінің максималды мәні $X = r$ шамасында қабылданады (сурет 4.25 және сурет 4.26 а - сурет), яғни ішкі цилиндрдің бетінде:

$$E_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (4.14)$$

Геометриялық сипаттаманы енгізу арқылы

$$p = \frac{r+a}{r} = \frac{R}{r}, \quad (4.15)$$

тесіліп өту кернеуі үшін

$$U_{\text{тесіліп өту кернеуі}} = E_{\text{тесіліп өтуі}} \cdot r \cdot l_{\text{тесіліп өтуі}}. \quad (4.16)$$

Өйткені геометриялық сипаттамалары тұрақты және ішкі цилиндрдің радиусына пропорционал екенің төмендегі өрнектен байқауға болады

$$\alpha = r \cdot l_{\text{тесіліп өтуі}}. \quad (4.17)$$

Озонатордын пайдалы әсер коэффициентін анықтау үшін келесі өрнекті қолданамыз

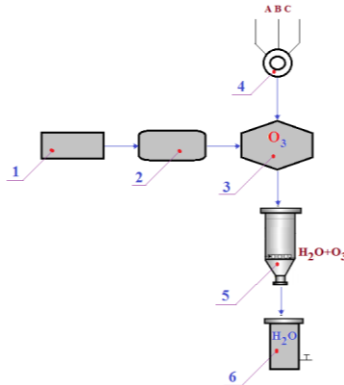
$$\eta = \frac{\alpha}{a} = \frac{r}{(a+r)-r} \ln p = \frac{1}{p-1} \ln p \quad (4.18)$$

Бұл жағдайда озонатордын пайдалы әсер коэффициенті тек геометриялық сипаттамаға байланысты болады. Құрылғының пайдалы әсер коэффициентін қолдана отырып, төмендегі формула бойынша тесіліп өту кернеуін таба аламыз.

$$U_{\text{тәсіліп өту кернеуі}} = E_{\text{тәсіліп өтуі}} \cdot a \cdot \eta \quad (4.19)$$



а) Тәжірибелік қондырғының жалпы бейнесі



б) Тәжірибелік қондырғының құрылымдық сұлбасы

мұндағы 1) қондырғыны басқару бөлігі; 2) жоғарғы вольтты торап көзі (генератор) 3) электрлі тәжі разрядқа негізделген озонатор; 4) компрессор; 5) резервуар; 6) таза су резервуары.

Сурет 4.27 - Тәжірибелік қондырғы

Құрылғы келесідей жұмыс істейді. Атмосфералық ауа немесе оттегі (O_2) компрессордың көмегімен озонаторға жіберіледі, озонатор шықпасындағы озон (O_3) сарқынды суы бар ыдысқа келіп су тегі молекуласымен (H_2O) өзара байланысқа түседі.

Зертханада арнайы тәжі разрядқа негізделген озонатордың жаңа түрі әзірленді және теориялық, тәжірибелік сынаақтан өткізілді. Озонатордың энергетикалық тиімділігімен құрылысының қарапайымдылығы анықталды.

Суды озондау қондырғысына тәжірибелік зерттеулер жүргізілді. Озонның өнімділігі мен нақты энергия шығыны тәжірибелік жолмен анықталды. 3б - суретте сарқынды суларды тазартуға арналған тәжірибелік қондырғының құрылымдық сұлбасы көрсетілген. Қондырғының техникалық параметрлері төмендегі кестеде 4.17 келтірілген.

Кесте 4.17 - қондырғының техникалық параметрлері

1	Электр желісінің кернеуі	3кВ, 50 Гц
---	--------------------------	------------

2	Тұтынылатын қуаты	125 Вт
3	Өңделетін су көлемі	2 текше метрге дейін
4	Бір реттік әрекет ету уақыты	10 мин
5	Салмағы	10,5 кг

Озонатордағы қуат тығыздығы мен газдың температурасын анықтау ол озонаторда таралатын активті қуаттың электродтардың разряд аймағына қатынасы.

$$U_1(x,t) = A_1 + B_1 \times \Phi\left(\frac{x}{2a_1\sqrt{t}}\right), \text{ кВ}, \quad (4.20)$$

бұл жерде $U_1(x,t)$ - иондалған аймақтағы тосқауылдың бетіне кернеудің таралуы, A_1 және B_1 – шекаралық шарттардан анықталатын тұрақты (қателік интегралы).

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \quad (4.21)$$

$$a_1 = \frac{1}{\sqrt{(Rp + Rэ)Cб}}. \quad (4.22)$$

Иондану шекарасындағы жағдай $x = \xi$:

$$U_{ист} + B_1 \times \Phi\left(\frac{\xi}{2\sqrt{t}}\right) = U_1(\xi, t) \quad (4.23)$$

бұл формуладан микроразрядтың қалыптасу уақытын былай есептеуге болады:

$$t\phi = (\xi / \psi)^2 \approx 3,3 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$

Микроразряд әсерінен пайда болу кернеуі (минималды):

$$U_{min} = I_m \cdot r_{микр} = 0,64 \cdot 2100 \approx 1,35 \text{ кВ},$$

Құрылғыдағы кернеуді (активті элементтегі кернеу) келесідей анықтауға болады:

$$U_{активті\ кернеу} = 1,35 / \sqrt{2} = 0,96 \text{ кВ}$$

Ғылыми зерттеу жұмыс барысында суды озондау және коагуляция, тұндыру және сүзу, сондай-ақ собрциялық дәстүрлі тазарту әдістері қосымша қолданылды. Сондықтан барлық ғылыми тәжірибелік зерттеулерде озон арқылы суды тазарту тиімділігін байқауға болады. (2-кесте) [12.13]. Судың сапасы көбінесе әртүрлі толқын ұзындығында спектрограммалардың деректерімен

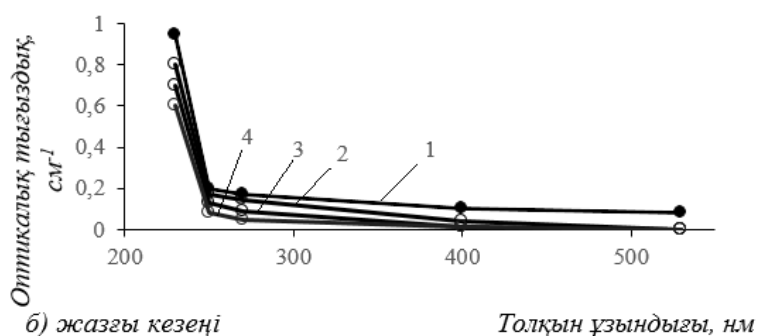
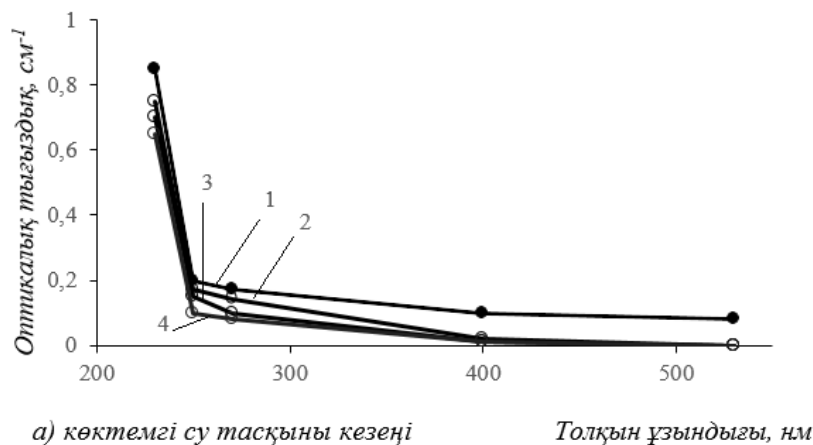
суреттеледі (мысалы нитраттар 220 нм, органикалық заттардың жалпы мөлшері 254 нм, түс 400 нм ал судың бұлдырлығы 540 нм).

4-суретте түрлі толқын ұзындығындағы УК-спектрометрия нәтижелері берілген. Суреттен озондаудан кейін органикалық заттардың мөлшері орта есеппен 30% - ға, коагуляциядан, тұндырғыштардағы ағартудан және құм сүзгісі арқылы сүзуден кейін 10-нан 80% - ға дейін (орта есеппен 45%) төмендегенін көруге болады. Сорбциялық сүзгі қосымша органикалық заттардың құрамын тағы 50-70% төмендетеді (орта есеппен 65%) [8].

Кесте 4.18 - Озон мен белсендірілген көмірді әртүрлі технологиялық сұлбаларда қолдану тиімділігі [10,11]

№	Су тазалау сұлбалары	Сынамалар атауы	Озонның мөлшері, мг/л	Тұнықтығы мг\л	Түсі, град	Тотығу
1		Бастапқы су		37,6	93	5,39
		Озондалған су (1-рет)	2,0	16,9	41	4,8
		Коагуляциядан кейін		0	14	4,48
		Озондалған су (2-рет)	2,4	0	0,5	3,22
		Көмір сүзгісі		0	0	1,27
2		Бастапқы су		37,6	93	5,39
		Коагуляциядан кейін		1	7	4,2
		Көмір сүзгісі		0,5	0	2,4
3		Бастапқы су		37,6	93	5,39
		Коагуляциядан кейін		0	7	3,2
		Озондалған су (2-рет)	2,4	0	0	3,06
		Көмір сүзгісі		0	0	2,33
4		Сүзгіден екінші рет өткізу		0	0	1,89
		Озондалған су (2-рет)	3,3	0	0	1,93
		Көмір сүзгісі		0	0	1,0

Бұл зерттеу кезеңдерінде су сапасы бойынша зиянды заттектер бірнеше пайызға азайғандығын байқауға болады (мысалы тазартылған және сүзілген суда бұлдырлық пен түс болмайтындығын көруге болады) [8,10].



Мұндағы 1 – бастапқы су; 2 – озондалған су; 3 - құмды жүктеуден кейінгі су; 4 – көмір жүктеуден кейінгі су.

Сурет 4.28 - УК спектограммалар деректері

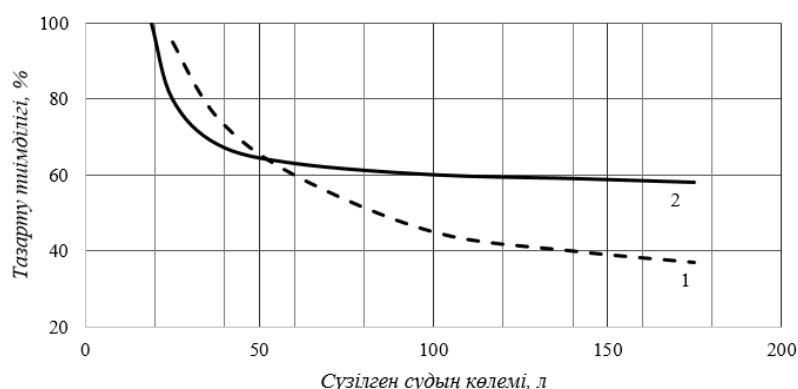
АГ-3 маркалы көмір көмегімен биологиялық үрдістің нәтижесін анықтау үшін арнайы зерттеу жұмысы жүргізілді. 50 күн бойы АГ-3 маркалы көмірі тиелген екі бағанға коагулянтпен өңделген өзен суын үздіксіз беріп, сүзгіден өткізілді. Суды белсенді көмір арқылы сүзуге жібермес бұрын 2 мг/л мөлшерде озон жіберілді, ал екінші жағдайда - озонсыз су көмір сүзгісіне жіберілді. Жүргізілген тәжірибелер нәтижесінде көмір сүзгісінің алдында озонды пайдаланған кезде органикалық лаस्ताушылардың мөлшері 30-35% - ға артатыны анықталды [12,13].

Бастапқы озондау сұлбасында Д254 ультракүлгін сіңіру индикаторымен сипатталатын органикалық заттарды алудың пайыздық әсері біршама төмен (5 - сурет). Содан кейін тазарту тиімділігі өзара өзгереді: белсенді көмір сұлбасы бойынша тазарту әсері уақыт өте келе төмендей береді, ал озондау және сорбциялық тазарту сұлбасы бойынша тазарту әсері іс жүзінде тұрақтандырылады. Қарастырылған екі нұсқаның тиімділігінің өзгеру сипаты, алдын-ала озондау сұлбасында көмірдегі қарқынды биологиялық үрдістің жүруінің жанама дәлелі болып табылады. Тиімділік қисықтарының бастапқы

учаскелерінің орналасуы озондау нәтижесінде органикалық заттардың сіңірілуінің кейбір нашарлауымен түсіндіріледі. Бұл молекулалардың полярлығының жоғарылауына және олардың молекулалық салмағының төмендеуіне әкеледі.

Сүзу циклінің соңында озондалған суды тазартқаннан кейін белсенді көмірдің сорбциялық сыйымдылығының төмендеуі озонмен өңделмеген суды тазартумен салыстырғанда шамамен 2 есе аз екендігі анықталды. Мұны белсенді көмірдің био-регенерация үрдісінің жүруімен түсіндіруге болады. Сондай-ақ, озондау кезінде белсенді көмірде табылған микроорганизмдердің саны 3,5 есе көп екендігі атап өтілді.

Құмкөл елді мекенінің суын тазартудың тиімділігі 4.19 және 4.20 кестелерде көрсетілген.



Мұндағы: 1 – белсенді көмір; 2 – озон белсенді көмірмен бірге

Сурет 4.29 - Коагуляциялық тазартудан кейін суды УК-сіңіру көрсеткішін төмендету әсері

Кесте 4.19 - Суды тазартудың әртүрлі кезеңдерінде органикалық ластағыштарды кетірудің тиімділігі

Көрсеткіштер	Өлшем бірлігі	Су сынамалары			
		Бастапқы су	озон	Құмды фильтр	Көмір фильтрі
Органикалық қосылыстардың жалпы құрамы (УК-толқын көрсеткіші 254 нм)		0,11-0,27	0,09-0,123	0,078-0,92	0,019 – 0,05
Мұнай өнімдері	мг/л	0,139 – 0,39	0,07 – 0,19	0,07 – 0,19	0 – 0,06
Фенолдар	мг/л	0,0017– 0,0056	0 – 0,0035	0,002 – 0,0038	<0,001 – 0,002
ОХҚ	мгО ₂ /л	25-45	15-27	18-29	12-23,4
ОБҚ ₅	мгО ₂ /л	1,32 – 3,03	2,3 – 2,7	0,55 – 0,57	0 – 0,32

Кесте 4.20 - Суды тазартудың әртүрлі кезеңдерінде органикалық емес лаптағыштарды кетірудің тиімділігі

Көрсеткіштер	Өлшем бірл.	Су сынағалары			
		Бастапқы су	Озонның концентрациясы 600мг	Құмды фильтр	Көмір фильтрі
Темір	мг/л	0,25	0,20	0,15	0,11
Аммонийлық азот	мг/л	0,8	0,47	0,3	0
Нитриттар	мг/л	0,12	0,022	0,002	0,022
Нитраттар	мг/л	16,4	15,0	15,5	15,5
Марганец	мг/л	0,55	0,17	0,0023	0,0014
Бериллий	мг/л	2000	0	0	0

Озонның тиімділігін және озондауға дейін және одан кейін органикалық қосылыстардың болуын анықтау бойынша жұмыстардың үлкен кешені Іле өзенінің (Алматы облысы, Қапшағай қаласы) суын тазарту кезінде жүргізілді [10.11]. Тәжірибе барысында екі кезеңді озондауды, реагентті өңдеуді және суды сорбциялық тазартуды қолдану сұлбасы қарастырылды. Тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері 4.21 - кестеде келтірілген.

Кесте 4.22 Су тазарту сатылары бойынша сапалық көрсеткіш [163-165]

Көрсеткіштер	Бастапқы су	Кейінгі су			
		Бастапқы озондау	Құмды фильтр	Қайта озондау	Сорбциялық сүзгі
Бұлдырлық, мг/л	8	5	1,7	1	0
Түсі, град.	10,5	6,5	5	0,1	0
Тотығу, мгО ₂ /л	2,2	2	2	1	0,4
Нитраттар, мг/л	1,5	2	1,8	1,1	1
Жалпы темір, мг/л	0,37	0,3	0,2	0,1	0
Аммиак, мг/л	1,8	0	0	0	0
Мұнай өнімдері мг/л	0,12	0	0	–	–
Металлдар, мг/л					
Мыс	0,025	0,019	0,018	0,018	0,018
Қорғасын	0,007	0,007	0,005	0,003	0,002
Никель	0,025	0,014	0,015	0,015	0,014
Кобальт	0,007	0,003	0,002	0,002	0
Хром	0,02	0,004	0,002	0,002	0,002
Ванадий	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001
Титан	0,049	0,038	0,027	0,027	0,027
Молибден	0,0015	0,0014	0,0011	0,0009	0,0007
Күміс	0,0015	0,001	0,0002	0,0001	0,0001
Барий	0,039	0,038	0,036	0,036	0,036
Цирконий	0,025	0,014	0,014	0,009	0,009
Стронций	0,392	0,288	0,27	0,27	0,27

Марганец	0,074	0,038	0,027	0,023	0,018
Коли-индекс, кл/л	>1100	<3	<3	<3	<3
Жалпы микробтық саны, кл/мл	200	80	98	85	98

Алынған нәтижелерден бастапқы озондаудан кейін хром, перманганаттың тотығуы, темір, мұнай өнімдерінің, металл иондарының және басқа да ластаушы заттардың концентрациясы едәуір төмендегенін көруге болады.

Суды одан әрі тазарту кезінде органикалық және бейорганикалық ластаушы заттар одан әрі жойылады (толығымен немесе стандарт талаптарына дейін). Алайда кальций, магний, сульфаттар, хлоридтер, рН мәні, сілтілік және қаттылық іс жүзінде өзгермейді.

Бактериологиялық көрсеткіштер бойынша бастапқы озондаудан кейін судың сапасы стандарт талаптарына сәйкес келді.

Шетелдік ғылыми зерттеу жұмыстарында мұндай тәжірибелік ізденістер жүргізілген. Мысалы табиғи судағы органикалық ластанудың құрамын және озонды пайдаланып суды тазарту үрдісінде оның өзгеруін зерттеу үшін ММУ химия факультетінің мамандары хромато-масс-спектрометрия әдісімен судың сапасын талдаумен арнайы зерттеулер жүргізді [14,15].

Зерттелген су сынамаларында әртүрлі химиялық сипаттағы 230 органикалық қосылыстар анықталды, олардың 27-сі АҚШ қоршаған ортаны қорғау агенттігінің тізіміндегі қауіпті ластану санатына кірді. Төмендегі 4.23-кестеде Санитарлық ережелер және норма мен нормаланатын органикалық ластану құрамының өзгеруі туралы деректер ұсынылған [10,13].

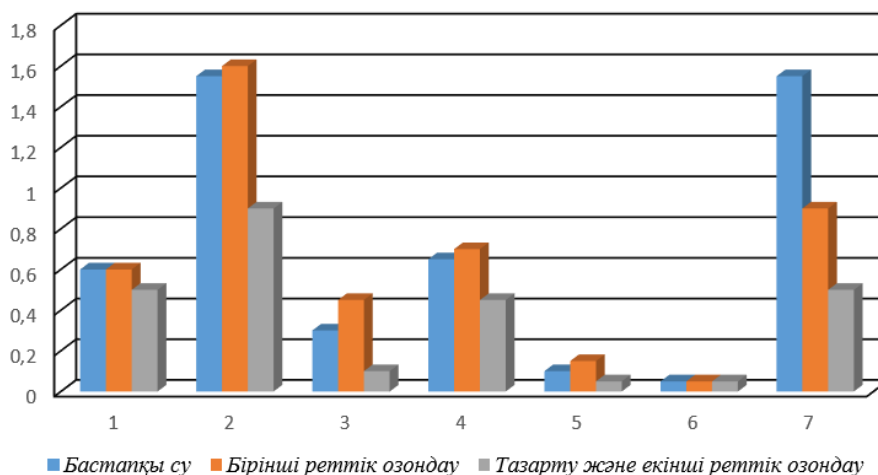
Кесте 4.23 - Судағы органикалық қосылыстардың құрамына озондаудың әсері

Көрсеткіштер	ШРК, мг/л	Су, мг/л		
		өзен	озондалған	тазартылған
1	2	3	4	5
Жалпы санитарлық және органолептикалық көрсеткіштер бойынша нормаланады				
Ацетальдегид	0,2	0,01	0,026	0,02
Ацетон	2,2	0,035	0,035	0,035
Дихлорметан	7,5	0,4	0,4	0,035
1,3,5-тринитротолуол	0,5	0,003	0,003	<0,001
Толуол	0,5	0,2	0,2	0,035
П-Ксилол	0,05	0,035	0,035	0,003
М-Ксилол	0,05	0,035	0,035	0,008
О-Ксилол	0,05	0,008	0,008	0,003
Стирол	0,1	0,003	0,035	<0,001
Гексан	0,5	0,08	0,035	0,003
Изопропилбензол	0,1	0,003	0,003	<0,001
α-Метилстирол	0,1	0,003	0,003	<0,001
Вторбутилбензол	0,1	0,003	0,003	<0,001
Третбутилбензол	0,1	0,008	0,008	0,001
2-этил-1-гексан	0,15	0,035	0,003	0,008

Бензтиозол	0,25	0,008	0,003	0,003
Ди-н-бутилфталат	0,2	0,4	0,4	0,2
Ди-н-октилфталат	1	0,08	0,035	0,035
Аентальдегид	0,2	0,08	0,08	0,08
2-бутен	0,2	0,003	0,003	0,003
Ацетонитрил	0,7	0,035	0,035	0,035
Акиронитрил	2	0,001	0,003	0,001
2-метилфуран	0,5	0,003	0,003	0,003
3-пентанон	0,03	0,001	0,008	0,008
2,3-демитилбуталон	0,01	0,008	0,008	0,008
2-метил-2-пентанол	0,01	0,003	0,003	0,003
Бензальдегид	0,003	0,003	0,008	0,008
Гептанол	0,005	0,008	0,003	0,08
Фенол	0,001	0,003	0,003	0,003
Нафталин	0,01	0,003	0,003	0,003
Санитарлық және токсикологиялық көрсеткіштер бойынша нормаланады				
Формальдегид	0,05	0,005	0,024	0,01
Фуран	0,2	0,008	0,008	0,008
Кротоновый альдегид	0,3	0,001	0,003	0,003
Ацетофенон	0,1	0,001	0,003	0,003
1,2-дихлорэтилен	0,006	0,008	0,003	<0,001
Хлороформ	0,06	0,2	0,2	0,035
1,2-дихлорэтан	0,02	0,008	0,008	<0,001
Бензол	0,5	0,008	0,008	0,003
Трихлорэтилен	0,06	0,008	0,003	<0,001
Линдан	0,004	0,035	0,035	0,003
Дифенил	0,001	0,003	0,003	<0,001
диметилфталат	0,3	0,008	0,008	0,001

Кестеден көріп отырғанымыздай, су тасқыны кезеңінде іріктелген өзен суында судағы зиянды заттардың нормативтік құрамы бірқатар көрсеткіштер бойынша ШРК - дан асады.

Бастапқы озондаудан кейін ұсынылған органикалық ластанулардың концентрациясы біркелкі өзгереді: олардың кейбіреулері азаяды, басқалары артады. Суды коагуляция, жарықтандыру және озонмен қайта өңдеу арқылы одан әрі тазарту оның барлық органикалық қосылыстардағы сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік береді.

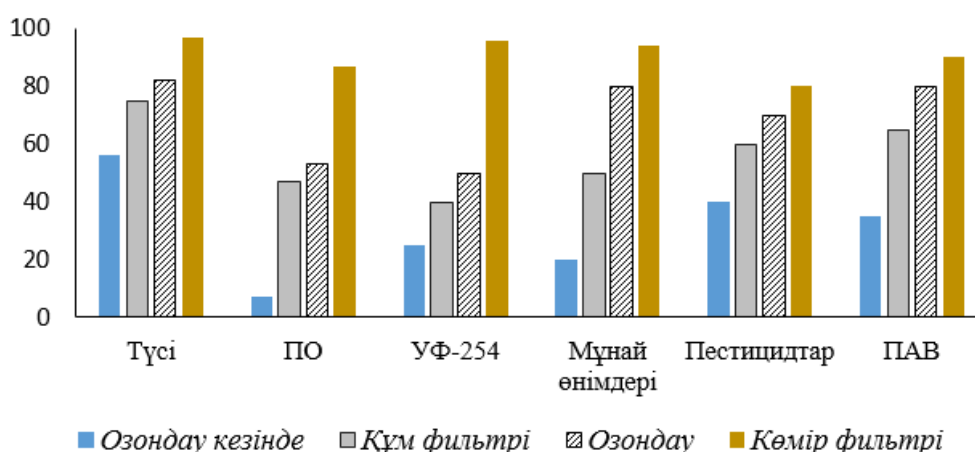


Мұндағы: 1 - құрамында галогені бар; 2 - алифатты; 3 - хош иісті; 4 - альдегидтер мен кетондар; 5 - терпен; 6 - құрамында азот бар; 7-спирттер мен эфирлер

Сурет 4.30 - Жайық өзенінің суын озондау және тазарту кезінде әртүрлі көмірсутектер концентрациясының өзгеруі [10,11]

Өзен суын озондау кезінде органикалық заттар құрамының өзгеруіне толықтай талдау барлық анықталған заттар бойынша жүргізілді. Органикалық ластанушы заттардың жойылуы нәтижесінде тотығудың жанама өнімдері пайда болады, ал кейбір қосылыстардың концентрациясы артады. 4.30 - суретте тазартылмаған және тазартылған өзен суының органикалық ластануының сапалық және сандық құрамының өзгеруі көрсетілген (көрнекі түрде көрсету үшін барлық анықталған органикалық қосылыстар шартты түрде негізгі сыныптарға бөлінеді) [16].

Әр түрлі кезеңдер бойынша суды ластанушылардан тазартудың тиімділігі туралы жалпыланған мәліметтер келтірілген (4.31 – суретте).



Сурет 4.31 - Суды тазарту кезеңдері бойынша әртүрлі ластануларды жоюдың тиімділігі (жалпыланған деректер бойынша)

Суды бастапқы озондау кезінде спирттердің, эфирлердің және галогені бар көмірсутектердің концентрациясы төмендейді, ал басқа кластардағы қосылыстардың мөлшері артады. Тазартылған суды екінші рет озондау кезінде барлық органикалық ластанулардың мөлшері азаяды.

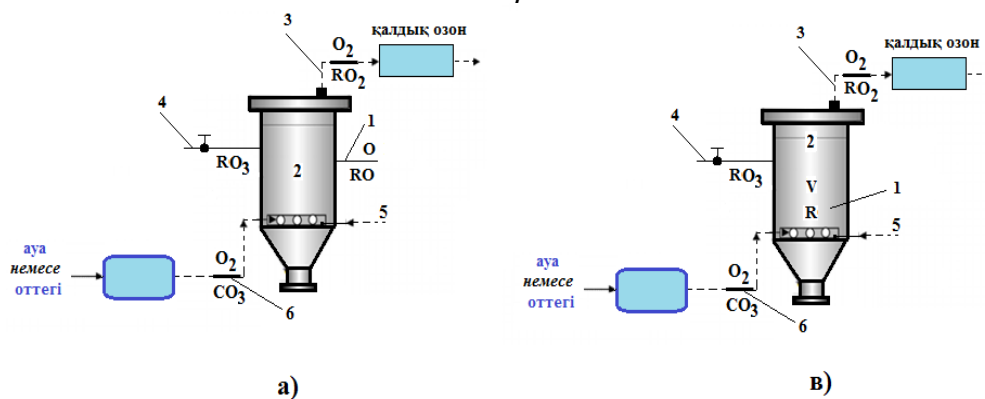
Статикалық түрдегі озондау үрдісінің сұлбалық диаграммасы мен динамикалық жағдайлары 4.32 - суретте көрсетілген. Суретте статикалық және динамикалық модельдеу әдістерінің барлық ұқсастығы бар. Үрдістің негізгі параметрлерін анықтаудағы елеулі айырмашылық мынадай:

а) жағдай үшін:

$$\begin{aligned}
 G &= G_0 + G_R + G_B \\
 G &= [CO_3] \cdot Q_B \\
 G_0 &= RO \cdot Q \\
 G_R &= [RO_3] \cdot Q_B \\
 Q_B [CO_3] &= RO \cdot Q + RO_3 \cdot Q + [RO_3] \cdot Q_B \\
 \eta &= G - G_B / G = 1 - G_B / G = 1 - [RO_3] / [CO_3] \\
 [CO_3] \cdot Q_B \eta / Q &= RO + RO_3 \\
 D_{O_3} &= [CO_3] \cdot Q_B / Q = RO + RO_3 / \eta \\
 RO &= \eta D_{O_3} - RO_3
 \end{aligned}$$

в) жағдай үшін:

$$\begin{aligned}
 G &= G_0 + G_R + G_B \\
 G &= [CO_3] \cdot Q_B \cdot T_k \\
 G_0 &= RO \cdot V \\
 G_R &= [RO_3] \cdot V \\
 Q_B &= [RO_3] = Q \cdot T_k \\
 Q_B [CO_3] \cdot T_k &= RO \cdot V + RO_3 \cdot V + [RO_3] \cdot Q_B \cdot T_k \\
 \eta &= G - G_B / G = 1 - G_B / G = 1 - [RO_3] / [CO_3] \\
 T_k \cdot [CO_3] \cdot Q_B \eta / V &= RO + RO_3 \\
 D_{O_3} &= T_k \cdot [CO_3] \cdot Q_B / V = RO + RO_3 / \eta \\
 RO &= \eta D_{O_3} - RO_3
 \end{aligned}$$



Мұндағы: а - динамикалық режим, в - статикалық режим, 1, 4 - бастапқы және озонмен тазартылған су; 2 - байланыс камерасы; 3, 6 - бастапқы және пайдаланылған озон-ауа қоспасы; 5 – кеуекті (пористый) диффузор; G –

енгізілген озон мөлшері; G_O – ластануды тотықтыру үшін қолданылатын озон, G_R – судағы озон қалдығының мөлшері; G_B – газ қоспасындағы қалдық озон мөлшері; Q – тазартылған су шығыны, $m^3/сағ$; V – тазартылған судың көлемі, $m^3/сағ$; Q_B – озон-ауа қоспасын тұтыну, $Hm^3/сағ$; R_O - бастапқы судың озонды сіңіруі, $мг/л$; $[CO_3]$ – озон концентрациясы озонатордан кейінгі қоспа (озон қоспалы ауа), $г/Hm^3$; $[RO_3]$ - кейін озон-ауа қоспасындағы озон концентрациясы байланыс камерасы, $г/Hm^3$; η -озонды пайдалану тиімділігі (ПӘК); D_{O_3} – озон мөлшері, $г/m^3$; T_k – уақыт озон-ауа қоспасының сумен жанасуы, $мин$.

Сурет 4.32 - Суды озондау үрдісінің құрылымдық сұлбасы

Статикалық модельдеу үлгісіндегі басты қателік байланыс камерасындағы жанасу уақытының нақты еместігі, себебі газдағы қалдық озон $[RO_3]$ концентрациясы тәуелсіз.

Бұл жағдайда қанықтыру үрдісі болғандықтан озонды бар су интегралды табиғат болып табылады, байланыс уақытын $T_k = 60 (V/Q)$, $\min (Q \text{ м}^3/\text{сағ пен өлшенеді, } V - \text{м}^3)$, формуласы бойынша анықтауға болмайды. Бұл формула динамикалық тәжірибе барысында қолданылады. Бірақ кез - келген уақыт аралығында озонатордан шыққан озон-ауа қоспасын тазартылған суға беру байланыс камерасынан шыққан озон мөлшерінің пайда болуы мен қатар жұмсалған озон-ауа қоспасы ескерілмейді $[RO_3] = 0$ ($\eta=1$). Сонымен қатар динамикалық модельдеу кезінде стационарлық динамикалық режимде η (ПӘК) шамасы сипатталмайды.

Зерттеу жұмысында анықталғандай, көп жағдайда ең тиімдісі-екі сатылы озондау сұлбасы. Мұндай технология органикалық ластануларды тотығуы бойынша 80 - 85% - ға, УК-көрсеткіші бойынша 95 - 99% - ға, мұнай өнімдері бойынша 90 - 95% - ға жоюды қамтамасыз етеді. Ғылыми зерттеу жұмысының нәтижесі бойынша тәжірибелік негізделген озонатордың экологиялық және экономикалық тиімділігін зерттеу нәтижелері “Journal of Ecological Engineering, 24(2): 140–151 беттер, 2023. ISSN 2299-8993 (2021) Web of Science: Инженерлік, Қоршаған орта, 2-тоқсанда” басылымында жарық көрді [105].

IV тарау бойынша қорытындылар

Разряд тізбегінің әртүрлі параметрлері бар озон генерациялау жүйелеріндегі ток импульстары мен микро разряд кернеулерінің осциллограммасына эксперименттік зерттеулер жүргізілді. Ол үшін шекті секцияланған электроды бар разрядты камераның физикалық моделі, ал осциллограммаларды алу кезінде мүмкін болатын кедергілерді болдырмайтын арнайы схема қолданылады. Бірнеше микро разрядтардың да, жекелеген импульстардың да осциллограммалары 10 нс істерге дейін сыпыру коэффициентімен алынды.

Белсенді кедергінің микро разряд тізбегіне тізбектей қосылған кезде, әдеттегі микро разрядпен салыстырғанда, микро разрядтың өтпелі процесінің

уақыты артады, ал микро разрядтың ток амплитудасы азаяды. Сонымен қатар, әдеттегі параметрлермен микро разрядпен салыстырғанда, τ_3 микро разрядының соңғы кезеңінің уақыт тұрақтысы шамамен 2 есе өсті: шамамен 20 нс-тен 50 нс-ке дейін. Микро разряд тогының амплитудасы да шамамен 2 есе төмендеді: шамамен 350 мА-дан 200 мА-ға дейін. Микро разряд тізбегіндегі индуктивтіліктің жоғарылауымен микро разряд тізбегінің индуктивтілігінің белгілі бір мәнінен бастап өтпелі процестің сипаты тербеліске айналады. Индуктивтілігі жоғарылаған микро разряд тогының импульсі әлсіреген тербелмелі сипатқа ие. Индуктивтіліктің жоғарылауымен T_p разряд уақыты шамамен 2 есе артады, сонымен бірге микро разряд тогының амплитудасы бірдей есе азайды.

Алынған бірнеше микро разрядтардың осциллограммаларына сүйене отырып, озон генерациялау жүйелерінде жоғары дәрежелі электродтарды қолдану тосқауыл разрядының біркелкілігін арттыруға мүмкіндік береді деген қорытынды жасауға болады. Микро разрядты ток импульстарының максималды мәндерінің таралуы кедергінің жоғарылауымен азаяды және бұл импульстардың уақыт бойынша таралуы біркелкі болады.

Электродтардың әртүрлі кедергісі бар озон генерациялау жүйелерінің электр энергетикалық және өндірістік сипаттамаларына эксперименттік салыстырмалы зерттеулер жүргізілді. Бұл зерттеулер үшін екі конструктивті типтегі жоғары оомды электродтары бар озон генерациялау жүйелерінің физикалық модельдері жасалды: қатты жазық параллель электродтары бар және электродтары бар, олардың біреуі диэлектриктің бетінде параллель сымдар түрінде бөлінген.

Тосқауыл разрядының Вольт Ампер сипаттамалары разрядты камера конструкцияларының екі түрі үшін де электродтардың кедергісіне тәуелді емес. Салыстырмалы эксперименттерге сәйкес жоғары токты электродтарды қолдану тиісті кернеу деңгейінде озон генерациялау жүйелерінің өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Жоғары өткізгіш электродтары бар жүйелермен салыстырғанда жоғары оомды электродтары бар озон генерациялау жүйелерінің өнімділігінің ең үлкен артуына жоғары кернеу мәндерінде қол жеткізуге болады.

Параллель сымдар түріндегі секцияланған электродты озон генерациялау жүйелері резисторларды секцияланған электрод элементтеріне қосу арқылы разряд кедергісін арттыруға мүмкіндік береді. Мұндай жүйелерде қолданылатын қарсылықты арттыру озон синтезінің энергия тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл ретте жүйелердің өнімділігін барынша арттыру жоғары өткізгіш электродтары бар жүйелермен салыстырғанда секцияланған жоғары оомды электродтары бар озон генерацияларына төмен кернеу мәндерінде қол жеткізуге болады.

Озонатор камерасының шығысындағы озоны бар газды қыздырудың электр тогына тәуелділігі секцияланған электродтың әртүрлі кедергілері үшін алынған. 10^4 Ом тәртібіндегі тозуға төзімділікке, бұл разряд аймағында бөлінетін температураны төмендетуге мүмкіндік береді. Бұл құбылыс кедергісі жоғары электродтары бар озонды генерациялау жүйелерінде микро разряд

импульстерінің біркелкі ағынымен түсіндіріледі, атап айтқанда, жеке микроразрядтардың ұзақтығының бір мезгілде ұлғаюымен максималды микроразрядтық токтың төмендеуі.

Тәжірибе кезінде салыстырмалы ылғалдылықтың 40%-дан 57%-ға дейінгі диапазондағы мүмкін ауытқуы озонды генерациялау жүйелеріндегі токты өлшеудің және салыстырудың салыстырмалы қателігін жоғары кедергілі электродтардың әртүрлі белсенді кедергілерімен 10%-ға дейін арттырады.

4.24 - кестеде $U_{\text{нақты}} \approx 10$ кВ кернеудегі жоғары кедергілі электродтармен тосқауылдық микроразрядтардың теориялық және тәжірибелік зерттеулерінің салыстырмалы нәтижелері келтірілген.

Кесте 4.24 – Жоғары кедергілі электродтармен тосқауыл микроразрядының негізгі параметрлері

Параметр	Есептеу нәтижелері	Тәжірибе нәтижелері
Қалыптасу уақыты $t_{\text{ф}}$, нс	2,8	25
Аяқталу уақытының тұрақтысы τ_3 , нс	2,4	40
Максималды ток I_m , А	0,54	0,27

Есептеулер оны әзірлеу кезіндегі микроразряд кедергісінің сызықты еместігін, сондай-ақ индуктивті және индуктивті кедергіні ескермеді. Бұл эксперименталдымен салыстырғанда микроразрядтың түзілу ($t_{\text{ф}}$) және аяқталу уақытының (τ_3) кіші есептік мәнін және сәйкесінше максималды микроразряд тоғының (I_m) үлкен есептік мәнін түсіндіреді.

Ғылыми зерттеу жұмысында кедергісі жоғары электродтары бар бөгеттік разрядтағы озон генерациялау жүйелеріне зерттеу жүргізілді. Кедергі микроразрядының иондалған аймағының түзілу және қайта зарядталу үрдістерін сипаттайтын математикалық модельдер жасалды. Эксперименттік зерттеулердің нәтижелері берілген, олардың талдауы Ғылыми зерттеу жұмысының практикалық маңыздылығын растайды және кедергісі жоғары тосқауыл типті электродтары бар озон генерациялау жүйелерін пайдалану бойынша ұсыныстарды тұжырымдауға мүмкіндік береді. Ғылыми зерттеу жұмысында көрсетілген нәтижелер негізінде келесі тұжырымдарды тұжырымдауға болады:

1. $10^3 - 10^4$ Ом шамасындағы разряд камерасының электродтарының белгілі жоғары белсенді кедергісінен ерекшеленетін тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерінің физикалық модельдері әзірленді және зерттелді.

2. Озонды генерациялау жүйелерінің математикалық модельдері жоғары тосқауыл электродтары бар тосқауыл разрядында жасалды, олардың көмегімен жоғары тосқауыл электродтары бар тосқауыл микроразрядының негізгі параметрлері анықталды.

3. Тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелеріне салыстырмалы эксперименттік зерттеу жүргізілді; тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерінің энергия тұтынуын азайтуды қамтамасыз ететін 3-5 кОм жоғары

тосқауыл электродтарының белсенді кедергісінің оңтайлы мәні эксперименталды түрде анықталды.

Микроразряд тізбегіне қосылатын белсенді кедергісімен ерекшеленетін тосқауыл разрядындағы озон генерациялау жүйелерінің физикалық модельдеріне салыстырмалы осциллографиялық зерттеу жүргізілді;

Микро разряд тізбегінің белсенді кедергісінің тосқауыл микро разрядының ток импульсінің амплитудасы мен ұзақтығымен байланысы анықталды.

Сондай-ақ, микро разрядтың индуктивті кірістіру кедергісі бар озон генерациялау жүйелері әзірленді [18]. Бұл жүйелер жоғары өткізгіш электродтары бар озон генерациялау жүйелерімен салыстырғанда микро разрядты үрдістердің біркелкілігін жоғарылатады.

Ғылыми зерттеу жұмыс тақырыбын одан әрі дамыту перспективасы тосқауыл түріндегі разрядты озонаторлық камералар жұмысының сенімділігін арттыруға жоғары дәрежелі электродтардың әсерін зерттеу болуы мүмкін.

ҚОРЫТЫНДЫ

Диссертациялық зерттеулердің нәтижелері бойынша қысқаша тұжырымдар

Алынған бірнеше микро разрядтардың осциллограммаларына сүйене отырып, озон өндіру жүйелерінде жоғары дәрежелі электродтарды қолдану тосқауыл разрядының біркелкілігін арттыруға мүмкіндік береді деген қорытынды жасауға болады. Микро разрядты ток импульстарының максималды мәндерінің таралуы кедергінің жоғарылауымен азаяды және бұл импульстардың уақыт бойынша таралуы біркелкі болады. Электродтардың әртүрлі кедергісі бар озон генерациялау жүйелерінің электр энергетикалық және өндірістік сипаттамаларына эксперименттік салыстырмалы зерттеулер жүргізілді. Бұл зерттеулер үшін екі конструктивті типтегі жоғары омды электродтары бар озон генерациялау жүйелерінің физикалық модельдері жасалды: қатты жазық параллель электродтары бар және электродтары бар, олардың біреуі диэлектриктің бетінде параллель сымдар түрінде бөлінген. Тосқауыл разрядының вольт - амперлік сипаттамалары разрядты камера конструкцияларының екі түрі үшін де электродтардың кедергісіне тәуелді емес. Салыстырмалы эксперименттерге сәйкес жоғары токты электродтарды қолдану тиісті кернеу деңгейінде озон генерациялау жүйелерінің өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Жоғары өткізгіш электродтары бар жүйелермен салыстырғанда жоғары омдық электродтары бар озон генерациялау жүйелерінің өнімділігінің ең үлкен артуына жоғары кернеу мәндерінде қол жеткізуге болады.

Диссертациялық зерттеу нәтижелері бойынша:

Тәжіленуші электрод айналасында тәжі разрядтық ток эволюциясының математикалық заңдылықтары орнатылды. Сонымен қатар тәжіленуші электродтарды жасау технологиясының элементтері әзірленді және ол озонатор қондырғыларының жаңа конструкциясын жасауға мүмкіндік береді. Ұсынылған конструкция белгілі бір уақытта өнімділікті 20% пайызға дейін арттырады. Зерттеу жұмысы барысында салыстырмалы осциллограммаларды, сондай - ақ электр қуатын тәжірибелік зерттеулер, физикалық параметрлері, өнімділігі және температурасының модельдері әзірленді. Электр тізбектеріндегі жинақталған және үлестірілген параметрлер бойынша теорияны қолдану арқылы математикалық модельдеу жүргізілді. Құрылғының конструкциялық шешімі бойынша озонаторды салқындату жүйесі мен тәжіленуші электродқа жоғарғы жиілікті кернеу беру мәселесі зерттелді.

Қойылған міндеттердің шешімдерінің толықтығын бағалау:

Диссертациялық жұмыстың нәтижесінде қойылған барлық міндеттер орындалды:

1. Озонатор жүйесінің тиімділігін арттырудың жаңа әдісі микроразряд айналасында яғни камерада қалыптасқан температураны төмендету, сол сияқты тәжіленуші электродтың кедергісін азайту қажеттігі анықталды.

2. Тәжіленуші электрод айналасында разряд әсерінен туындаған озон түзу жүйелерінің математикалық модельдері құрылды.

3. Жоғарғы жиілікті кернеу әсерінен туындаған тәжі разряд арқылы озонды өңдеу жүйелерінің жұмыс үлгілері, осциллографиялық зерттеуді жүргізуге мүмкіндік беретін электр қуатының параметрлерін анықтау, өлшеу, салыстыру және электродтардың әртүрлі активті кедергілеріндегі өнімділігі анықталды.

4. Ұсынылып отырған ЭТРО - 03 тәжі разрядқа негізделген озонатордың теориялық және эксперименттік зерттеу нәтижелері бойынша озонды өңдеу жүйелерінің өнімділігі мен энергия тиімділігін арттыру анықталды.

ПАЙДАЛАНЫЛГАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Пат. 1809965 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Высокочастотный безбарьерный озонатор / Е.Г. Безруких, Б.Б. Долгополов - № 4909067/26; заявл. 07.02.91; опубл. 10.11.05.
2. Лунин, В.В. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов: Учебное пособие / В.В. Лунин, Н.В. Карягин, С.Н. Ткаченко, В.Г. Самойлович – М.: МАКС Пресс, 2008. – 216 с.
3. ГНЦ РФ ТРИНИТИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.triniti.ru.
4. Курганхиммаш. Ведущий производитель оборудования для нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kurgankhimmash.ru>.
5. Лунин, В.В. Физическая химия озона / В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 480 с.
6. Кожин, В.Ф. Озонирование воды / В.Ф. Кожин, И.В. Кожин. - М., Стройиздат, 1973. - 160 с.
7. Боголицын, К.Г. Перспективы озонных технологий в химической переработке древесины / К.Г. Боголицын, Т.Э. Скребец // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005. – С. 47-56.
8. Лунин, В.В. Применение и получение озона / В.В. Лунин, Н.В. Карягин, С.Н. Ткаченко, В.Г. Самойлович. - М.: Изд-во «Книжный дом Университет», 2006. - 128 с.
9. Лунин, В.В. Озон в очистке газовых выбросов, сельском хозяйстве и подготовке питьевой воды: учебное пособие / В.В. Лунин, Н.В. Карягин, С.Н. Ткаченко, В.Г. Самойлович. - М.: МАКС Пресс, 2010. - 232 с.
10. Драгинский, В.Л. Роль озонирования в свете новых требований к качеству питьевой воды / В.Л. Драгинский, Л.П. Алексеева // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005. – С.57-73.
11. Кожин, В.Ф. Озонирование воды / В.Ф. Кожин, И.В. Кожин. - М., Стройиздат, 1973. - 160 с.
12. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Станартинформ, 2008.
13. Филиппов, Ю.В. Электросинтез озона / Ю.В. Филиппов, В.А. Вобликова, В.И. Пантелеев. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 237 с.
14. Кислород в организме человека [Электронный ресурс] / "Здоровье и психология". 2015. 10 июля. – Режим доступа: <https://zdips.ru/zdorovoepitanie/mineraly/1626-kislород-v-organizme-cheloveka.html>.

15. Самойлович, В.Г. 20-ый всемирный конгресс по озону и 6-ой всемирный конгресс по ультрафиолету. Париж, Франция. Май 2011г. Краткий обзор научных докладов / В.Г. Самойлович // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы 32-го Всероссийского семинара / Под редакцией В.В. Лунина, В.Г. Самойловича, С.Н. Ткаченко. – М.: Изд-во «Макспресс», 2012. – С. 19 - 40.

16. Скребец, Т.Э. Применение озона для отбеливания целлюлозы / Т.Э. Скребец, К.Г. Боголицын, Т.С. Сыркова // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005. – С. 240.

17. Шаланова, Е.А. Комплексное использование окислителей в технологии очистки воды / Е.А. Шаланова, П.С. Сёмин, Е.Э. Димитров, К.Г. Тютюшев // 135 Современные тенденции развития науки и технологий. - 2017. - № 2-3. - С. 57-59.

18. Атомарный кислород и его влияние на человека [Электронный ресурс] / ВекЖиву.ком. — Оздоровительный проект. 2011. 11 сентября. – Режим доступа: http://vekzhiv_u.com/article/395-atomarnyi-kislorod-i-ego-vliyanie-nacheloveka.

19. Туровский, Б.В. Опасные и вредные примеси природных и питьевых вод / Б.В. Туровский // Научный журнал КубГАУ. - 2014. - №102(08). - С. 1-14.

20. Алексеев, Л.С. Техничко-гигиенические аспекты фторирования воды / Л.С. Алексеев, Г.А. Ивлева, Заед Садик Абрахем Аль-Амри // Вестник МГСУ. - 2012. - № 3. - С. 154-158.

21. Горбунов, А.К. Аналитический обзор реагентов, используемых в водоподготовке / А.К. Горбунов, О.П. Петросян, Д.В. Рябченков // Электронный журнал: наука, техника и образование. - 2016. - № 1 (5). - С. 195-215.

22. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурнобытового водопользования / Министерство здравоохранения Российской Федерации, «Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава России», Москва, 2003 г.

23. ГН 2.1.5.2280-07 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315- 03 / Главный государственный санитарный врач Российской Федерации. - Постановление от 28 сентября 2007 года № 75 (действующее).

24. Козлов, К.В. Современный уровень понимания механизма барьерного разряда в смесях кислорода с азотом / К.В. Козлов // Материалы Первой всероссийской конф. «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии», посвящённой 250-летию МГУ им. М.В. Ломоносова. - М., 2005. - С. 81–94.

25. Луцевич, И.Н. Гигиеническая оценка трансформации сложных органических веществ, образующихся в результате обеззараживания питьевой

воды хлором / И.Н. Луцевич // Казанский медицинский журнал. - 2003. - Т. 84. - № 2. - С. 142-145.

26. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание / Ю.П. Райзер - 3-е изд. перераб. и доп. - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. - 736 с.

27. Самойлович, В.Г. Физическая химия барьерного разряда / В.Г. Самойлович, В.И. Гибалов, К.В. Козлов. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.

28. Ghazanchaei, Mohammadreza. Secondary Electrohydrodynamic Flow Generated by Corona and Dielectric Barrier Discharges. - 2015. (URL: <http://ir.lib.Uwo.ca/etd/3295>).

29. Kogelschatz, U. Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications / U. Kogelschatz, B. Eliasson, W. Egli // Jo Urnal de Physiq Ue IV Colloq Ue. - 1997. - 07 (C4). - P. C4-47-C4-66.

30. S Uz Uki, M. On the nature of chemical reaction in silent discharge II / M. S Uz Uki, Y. Naito // Proc. Japan Acad. - 1952. - Vol. 26. - No. 9. - P. 20-24.

31. пат. 2200126 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Электрогазодинамическое устройство / Пичугин Ю.П. - № 2001133509/12; заявл. 07.12.01; опубл. 10.03.2003, Бюл. № 7.

32. Пичугин, Ю.П. Экспериментальное исследование структуры барьерного разряда / Ю.П. Пичугин // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005. – С. 147.

33. Brandenb Urg, R. Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and singlefilaments / R. Brandenb Urg // Plasma Sources Science and Technology. - 2017. - Vol. 26. - 29 pp. (URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa6426>).

34. Kogelschatz, U. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications / U. Kogelschatz // Plasma Chemistry and Plasma Processing. - 2003. - Vol. 23. - No. 1. - P. 1–46.

35. Ткаченко, И.С. Моделирование синтеза озона в поверхностном барьерном разряде в кислороде: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 02.00.04 / Ткаченко Илья Сергеевич. - М., 2010. - 20 с.

36. Guerra-Garcia, C. Gas-Confined Barrier Discharges: a Simplified Model for Plasma Dynamics in Flame Environments / C. Guerra-Garcia, M MartinezSanchez // Jo Urnal of Physics D: Applied Physics. - 2013. - Vol. 46. - No. 34.

37. Малашин, М.В. О возможности получения объемного диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении / М.В. Малашин, С.И. Мошкунов, В.Ю. Хомич, Е.А. Шершунова, В.А. Ямщиков // Письма в журнал технической физики. - 2013. - Т. 39. - Вып. 5. - С. 48-53.

38. Tay, W.H. Electrical Characteristics and Modeling of a Filamentary Dielectric Barrier Discharge in Atmospheric Air / W.H. Tay, S.L. Yap, C.S. Wong // Sains Malaysiana. - 2014. - Vol. 43(4). - P. 583–594.

39. Озонатор: а. с. 1564113 СССР: МПК С 01 В 13/11 / В.С. Энгельшт, Л.Т. Ларькина, Ю.И. Нашницын (СССР). - № 4402171/23-26; заявл. 01.04.88; опубл. 15.05.90, Бюл. № 18.

40. Озонатор: а. с. 1627506 СССР: МПК С 01 В 13/11 / В.С. Энгельшт, Л.Т. Ларькина, Ю.И. Нашницын (СССР). - № 4402172/26; заявл. 01.04.88; опубл. 15.02.91, Бюл. № 6.

41. Озонатор: а. с. 998328 СССР: МПК С 01 В 13/11 / М.В. Горохов, С.С. Баранов, В.И. Семенов, А.В. Катявин (СССР). - № 3305965; заявл. 22.06.81; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7.

42. Караффа-Корбуттъ, В.В. Озонъ и его примъненіе въ промышленности и санитаріи. - Спб.: Изд-ство «Образование», 1912.

43. Генератор озона: пат. 2116959 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.А. Потапенко, В.К. Андрейчук, Д.А. Нормов - № 95109197/25; заявл. 05.06.95; опубл. 27.07.98. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555326714800.

44. Озонатор: пат. 2040461 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.Х. Хайруллин, Р.К. Фаттахов, Ф.Р. Исмагилов, В.И. Лысенко - № 5028651/26; заявл. 25.02.92; опубл. 25.07.95. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555327027196.

45. Озонатор: пат. 2109678 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / О.А. Журавлёв, В.П. Марков - № 96113656/25; заявл. 26.06.96; 130 опубл. 27.04.98. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555327150362.

46. Озонатор: пат. 2122519 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.Х. Хайруллин, Р.К. Фаттахов, Ф.Р. Исмагилов, З.Р. Исмагилов - № 96113615/25; заявл. 26.06.96; опубл. 27.11.98. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555327213825.

47. Озонатор: пат. 2132815 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / В.В. Пацевич, В.В. Лопатин, В.Р. Кухта, А.Г. Сипайлов - № 97117987/25; заявл. 22.10.97; опубл. 10.07.99. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555327282348.

48. Плазмохимический генератор роторного типа: пат. 2034778 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / О.А. Журавлев - № 93010101/26; заявл. 26.02.93; опубл. 10.05.95. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/ /portal/IPS_R U#1555327353837.

49. пат. 1756267 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Устройство для обработки газа в электрическом разряде: [Электронный ресурс] / Н.Д. Быстров, О.А. Журавлёв, А.И. Кравцов - № 4862812; заявл. 26.08.90; опубл. 23.08.92. – Режим доступа: <http://www.findpatent.r U/patent/175/1756267.html>.

50. Матюнин, А.Н. Совершенствование электродных систем озонаторов / А.Н. Матюнин // Сборник материалов XII Межрегиональной конференции-фестиваля творчества учащейся молодёжи «Юность Большой Волги». – Чебоксары, 2010. – эл. диск. – С. 77-80.

51. Матюнин, А.Н. Характеристики импульсов тока барьерного разряда в озонаторе и их регулирование в практических целях / А.Н. Матюнин // Сборник научных трудов молодых учёных и специалистов. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009. – С. 44-47.

52. пат. 2135407 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Генератор озона Ю.П. Пичугина: [Электронный ресурс] / Ю.П. Пичугин - № 98115710/25; заявл. 17.08.98; опубл. 27.08.99. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_RU#1555326830791.

53. Озонатор: пат. 2084399 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.Х. Хайруллин, Р.К. Фаттахов, Ф.Р. Исмагилов - № 94003544/25; заявл. 03.02.94; опубл. 20.07.97. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_RU#1555327114188.

54. пат. 2105438 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 Плазмохимический генератор с самопрокачкой газа [Электронный ресурс] / О.А. Журавлёв, В.П. Марков - № 94013084/25; заявл. 12.04.94; опубл. 20.02.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_RU#1555327319933.

55. пат. 2027664 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Способ получения озона в электрическом разряде и устройство для его осуществления: [Электронный ресурс] / Ю.П. Пичугин, В.Н. Косолапов, В.Д. Тимофеев, О.Н. Зайцев - № 5031273/26; заявл. 16.01.92; опубл. 27.01.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_RU#1555327748526.

56. пат. 2187910 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Устройство барьерного разряда: [Электронный ресурс] / И.Г. Учайкин, П.Ф. Дьяков, М.Г. Комисаров - № 2001117791/12; заявл. 26.06.01; опубл. 20.08.02. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_RU#1555327792953.

57. пат. 2116244 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Устройство для дезодорации и бактерицидной обработки воздуха в электрическом разряде: [Электронный ресурс] / О.А. Журавлёв, А.В. Ивченко, В.И. Рябов, В.И. Серов, В.Г. Фейгин - № 95109197/25; заявл. 05.06.95; опубл. 27.07.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_RU#1555327821639.

58. пат. 2118938 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Устройство для получения озона в электрическом разряде: [Электронный ресурс] / Ю.П. Пичугин - № 95109197/25; заявл. 05.06.95; опубл. 27.07.98. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_RU#1555328069937.

59. пат. 2200126 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Электрогазодинамическое устройство: Пичугин Ю.П. - № 2001133509/12; заявл. 07.12.01; опубл. 10.03.2003, Бюл. № 7.

60. а. с. 1103488 СССР: МПК С 01 В 13/11. Высокочастотный трубчатый озонатор: [Электронный ресурс] / А.В. Катявин, М.В. Горохов (СССР). - № 3510878/26; заявл. 16.11.82; опубл. 27.03.95. – Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_RU#1555326327921.

61. а. с. 1058221 СССР: МПК С 01 В 13/11. Газоразрядный трубчатый элемент озонатора: [Электронный ресурс] / А.В. Катявин, В.И. Сорокина, М.В.

Горохов (СССР). - 3446923/26; заявл. 28.05.82; опубл. 10.03.95. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555326506715.

62. а. с. 864724 СССР: МПК С 01 В 13/11. Газоразрядный трубчатый элемент озонатора: [Электронный ресурс] / А.В. Катявин, М.В. Горохов (СССР). - № 2854027/26; заявл. 17.12.79; опубл. 10.03.95. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555326742997.

63. Озонатор: пат. 2061651 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / Ю.А. Волченко, А.Н. Рожнев – заявл. 10.06.93; опубл. 10.06.96. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555327081588.

64. пат. 2355627 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Устройство для генерирования озона: / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко - № 2007135585/15; заявл. 25.09.07; опубл. 27.09.09, Бюл. № 27.

65. пат. 2103225 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Устройство для получения озона: [Электронный ресурс] / Манфред Римплер - № 93058273/25; заявл. 11.12.92; опубл. 27.01.98. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555327997551.

66. а. с. 1495287 СССР: МПК С 01 В 13/11. Высокочастотный озонатор: / В.Б. Гаврилюк, В.А. Вобликова, Ю.В. Филиппов (СССР). - № 4264808/31-26; заявл. 23.06.87; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27.

67. пат. 2458855 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Генератор озона: / Н.А. Четвергов, Н.А. Токарев, П.П. Турчин, С.В. Мисюль - № 2011114700/05; заявл. 13.04.11; опубл. 20.08.12, Бюл. № 23.

68. пат. 2057059 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Малогабаритный генератор озона: [Электронный ресурс] / И.П. Верещагин, В.Б. Громовой, В.А. Жуков, А.В. Калинин, М.В. Козлов, Ю.А. Кузин, В.В. Панюшкин – заявл. 30.06.92; опубл. 27.03.96. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555326936947.

69. Озонатор: пат. 2132300 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / И.А. Потапенко, В.К. Андрейчук, Д.А. Нормов, В.В. Помазанов, А.А. Лиферь, В.П. Бойко - № 97104314/25; заявл. 27.03.97; опубл. 27.06.99. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555327241774.

70. пат. 2578158 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Озонатор и источник питания для него: / М.Н. Волков - № 2015100560/05; заявл. 12.01.15; опубл. 20.03.16, Бюл. № 8.

71. а. с. № 1807661 СССР: МПК С 01 В 13/11. Высокочастотный озонатор: / Е.Г. Безруких, Б.Б. Долгополов, В.Ю. Тришанков (СССР). - № 4789291/26; заявл. 06.02.90; опубл. 20.11.05, Бюл. № 32.

72. Озонатор: пат. 2016841 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / К.С. Демирчян, И.К. Алиев, Г.Г. Гусев, О.А. Склянченков - № 4946366/26; заявл. 14.06.91; опубл. 30.07.94. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555326985023.

73. Озонатор: пат. 2301773 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 / И.Г. Стрижков, О.Н. Разнован - № 2005137410/15; заявл. 01.12.05; опубл. 27.06.07, Бюл. № 18.

74. а. с. 468881 СССР: МПК С 01 В 13/10, G 05 D 27/00. Способ регулирования концентрации озона: / Иванов Ю.Е. (СССР). - № 1686635/23-26; заявл. 16.07.71; опубл. 30.04.75, Бюл. 16.

75. а. с. 691393 СССР: МПК С 01 В 13/11, G 05 D 11/13. Способ регулирования концентрации озона: / В.Ф. Хмара, Л.Н. Тропин, Ю.А. Мошков (СССР). - № 2614596/23-26; заявл. 15.05.78; опубл. 15.10.79, Бюл. 38.

76. пат. 3899684 США: МКИ С 01 В 13/12, F 25 В 9/02. Control system for corona discharge ozone generating Unit: [Электронный ресурс] / R. Tenney. - № 475760; заявл. 03.06.74; опубл. 12.08.75. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/US3899684>.

77. а. с. 839201 СССР: МПК С 01 В 13/11. Высокочастотный трубчатый озонатор: [Электронный ресурс] / М.В. Горохов, А.В. Катявин, В.И. Семенов, С.С. Баранов, Г.Н. Гончаров (СССР). - № 2621038/26; заявл. 14.06.78; опубл. 20.02.95. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/ /IPS_R U#1555326424004.

78. Генератор озона: а. с. 1742205 СССР: МПК С 01 В 13/11 / В.С. Савин, В.П. Симонов (СССР). - № 4663410/26; заявл. 30.12.88; опубл. 23.06.92, Бюл. 23.

79. Генератор озона: пат. 2046753 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / В.В. Данилин, М.П. Кокуркин, М.М. Пашин, Ю.В. Горбатский, В.П. Ельчинов, А.И. Смородин - № 93049882/26; заявл. 02.11.93; опубл. 27.10.95. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/ /IPS_R U#1555326664858.

80. Озонатор: пат. 2056343 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / В.И. Зубков - № 92006374/26; заявл. 16.11.92; опубл. 20.03.96. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/IPS_R U#1555327055555.

81. Генератор озона: пат. 2046753 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11 [Электронный ресурс] / В.В. Данилин, М.П. Кокуркин, М.М. Пашин, Ю.В. Горбатский, В.П. Ельчинов, А.И. Смородин - № 93049882/26; заявл. 02.11.93; опубл. 27.10.95. – Режим доступа: http://www1.fips.r U/wps/portal/ /IPS_R U#1555326664858.

82. Пичугин, Ю.П. Структура барьерного разряда и синтез озона / Ю.П. Пичугин // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо2005, «Книжный дом Университет», 2005 – С. 146.

83. пат. 2446093 Рос. Федерация: МПК С 01 В 13/11. Устройство для генерирования озона: / Е.В. Корса-Вавилова, Н.И. Пуресев, Е.А. Гордеева, Ю.А. Назаров, В.Я. Крылова - № 2010136167/05; заявл. 01.09.10; опубл. 27.03.12, Бюл. № 9.

84. Шапиро, С.В. Высокочастотный озонатор с адиабатическим охлаждением (методом Джоуля-Томпсона) / С.В. Шапиро, С.А. Дунаев, А.Ш.

Амирханов // «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». Материалы Первой Всероссийской конф. – М.: Изд-во ЧеРо-2005, «Книжный дом Университет», 2005 – С. 140-141.

85. Лунин, В.В. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов: учебное пособие / В.В. Лунин, Н.В. Карягин, С.Н. Ткаченко, В.Г. Самойлович. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 216 с.

86. Лунин, В.В. Физическая химия озона / В.В. Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко. - М.: Изд-во МГУ, 1998. - 480 с.

87. Самойлович, В.Г. Физическая химия барьерного разряда / В.Г. Самойлович, В.И. Гибалов, К.В. Козлов. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.

88. Андреев, В.В. Исследование эффективности плазмохимических генераторов озона на барьерном разряде в воздухе при атмосферном давлении / В.В. Андреев, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин, В.Г. Телегин, Г.Г. Телегин // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. - 2011. - № 4. - С. 112-117.

89. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. - 5-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.

90. Кравченко, Г.А. Исследование диэлектрических барьеров с короностойким покрытием и разработка высокоресурсных систем электродов генераторов озона: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.09.03 / Кравченко Галина Алексеевна. - Чебоксары, 2013. - 19 с.

91. Пичугин, Ю.П. Оценка геометрических и температурных параметров микроразрядов в барьерном разряде / Ю.П. Пичугин, Г.А. Кравченко // Вестник Чувашского университета. - 2011. - № 3. - С. 102-107.

92. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики: учеб. пособие / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – 6-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1999.

93. Андреев, В.В. Исследование структуры барьерного разряда вблизи электрода с цилиндрическим поперечным сечением / В.В. Андреев, Л.А. Васильева, А.Н. Матюнин, Ю.П. Пичугин // Прикладная физика. - 2011. - № 1. - С. 51-57.

94. Основы теоретической электротехники: учебное пособие / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышев, А.Н. Белянин. 2-е изд., стер. - Спб.: Издательство «Лань», 2008. - 592 с.

95. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др.; Под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.

96. Бочаров, Ю.Н. Техника высоких напряжений: учеб. пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2013. – 265 с.

97. Базуткин, В.В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: учебник для вузов / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; Под общ. ред. В.П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

98. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда. Научное издание / Ю.П. Райзер - 3-е изд. перераб. и доп. - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. - 736 с.
99. Самойлович, В.Г. Физическая химия барьерного разряда / В.Г. Самойлович, В.И. Гибалов, К.В. Козлов. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.
100. Ghazanchaei, M.R. Quasi-stationary numerical model of the dielectric barrier discharge / M.R. Ghazanchaei, K. Adamiak // Journal of Electrostatics. - Cocoa Beach, FL, USA. - 2013.
101. Полянин, А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / А.Д. Полянин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
102. Нуднова, М.М. Влияние полярности на свойства наносекундного поверхностного барьерного разряда в воздухе атмосферного давления / М.М. Нуднова, Н.Л. Александров, А.Ю. Стариковский // Физика плазмы. - 2010. - Т. 36. - № 1. - С. 94-103.
103. Соколова, М.В. Особенности электрических характеристик объёмноповерхностного разряда в трёхэлектродной системе в воздухе при импульсно-периодическом питании / М.В. Соколова, А.М. Никитин, С.А. Кривов, А.В. Лазуткин, И.Е. Ребров, М.В. Малашин, С.В. Небогаткин // Прикладная физика. - 2015. - № 5. - С. 39-43.
104. Kozlov, V. Nanosecond Surface Corona Discharge for Different Types of Strip Electrodes and Ceramic or Polymer Dielectrics / V. Kozlov, M. Sokolova, M.V. Temnikov, Alexander V. Timatkov, V.P. Vereshchagin // Plasmas and Polymers. - 2003. - Vol. 8. - No. 3. - P. 179-197.