

Кырг.
2020-41

W

Кыргыз Республикасынын Улуттук Илимдер академиясынын
академик Ж.Жеенбаев атындагы Физика институту жана
Б.Н.Ельцин атындагы Кыргыз-Орус Славян университети

Диссертациялык кеңеш Д.01.18.586

Кол жазма укугунда
УДК 553.981:537.52.1
(575.2)(043.3)

Медралиева Бубусара Ниясбековна

Плазмалык ширетүүдө жылуулук алмашуусунун
маселелерин сандык моделдөө

01.04.14. – Жылуулук физика жана теоретикалык жылуулук техника

Физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын изденип
алуу үчүн жазылган диссертациянын авторефераты

Бишкек – 2020

Диссертациялык иш академик У.Асаналиев атындагы тоо-кен жана тоо-кен технологиялар институтунда аткарылды.

Илимий жетекчиси: Кабаева Гульнара Джамалбековна, физика-математика илимдеринин доктору, профессор, И.Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинин маалыматтык технологиялар факультетинин деканы

Расмий оппоненттер: Лелевкин Валерий Михайлович, физика-математикалык илимдеринин доктору, профессор, Б.Н.Ельцин ат. Кыргыз-Орус Славян университетинин табигый техникалык факультетинин физика жана микроэлектроника кафедрасы

Бейшекеева Гулмира Джумабековна, физика-математикалык илимдеринин кандидаты, доцент, Ж.Баласагын ат. Кыргыз Улуттук университетинин физика жана электроника факультетинин физика кафедрасы

Алып баруучу мекеме: Абай атындагы Казак мамлекеттик университетинин математика, физика жана информатика институту, дареги: 050010, Казакстан, Алма-Ата шаары, Достык проспектиси 13

Диссертацияны жактоо Кыргыз Республикасынын Улуттук Илимдер академиясынын жана Б.Н.Ельцин атындагы Кыргыз-Орус Славян университетин Д 01.18.586 диссертациялык кеңешинде 2020-жылдын 21 – февралында саат 14:30 да болот, дареги: 720071, Бишкек шаары, Чуй проспектиси 265А. ДК Zoom 912 0920540 үчүн идентификатордук коду.

Диссертация менен КР УИАнын китепканасынын илимий залында жана info@iobjournal.org сайтынан танышууга болот. Дареги: 720071, Бишкек шаары, Чуй проспектиси 265А.

Автореферат « _____ » _____ 2020-ж. таратылды

Д 01.18.586

диссертациялык кеңешинин окумуштуу катчысы, ф.-м.и.д., профессор

Касмамьтов Н. К.

ИШТИН ЖАЛПЫ МҮНӨЗДӨМӨСҮ

Диссертациянын темасынын актуалдуулугу. Темирлерди электрдик жаачалык ширетүү заманбап өнөр жайда кеңири колдонулат жана өнөр жайдын көптөгөн аймактарында маанилүү технологиялык процесс болуп эсептелет. Ширетүү өтө татаал физика-химиялык жана металлургиялык процесс.

Ширетүү ваннасы негизги жана түрмөктөлгөн металлдын зеришинин эсебинен түзүлөт. Суяк металлдын кристалдашуусу негизги металлдын толук эмес ээриген буудайларынан башталат. Сапаттуу тигиштин түзүлүшүнө жылуулуктун булагынын иштетилүүчү буюмдун бетинен жылып жүрүү учурундагы «ээриген метал-тигиш-негизги метал» интерфейсинин түзүлүш шарты көрүнүктүү ролду ойнойт.

Электрдик жаачадагы, иштетилүүчү буюмдагы процесстерди, жана ошондой эле алардын өз ара таасирлениш процесстерин моделдөө ширетүү режиминин параметрлерин оптималдаштыруу үчүн жана жакшыртылган сапаттуу мүнөздөмөлөрү болгон ширетилген бирикмелерди алуу үчүн максаттуу.

Электрдик жаача жана ширетүү ваннасынын туташ жазылышындагы МГД теңдемелер системин эсептеп чыгуу чыңалуу талааларынын, гидродинамикалык, температуралык жана электромагниттик талаалардын өз ара аракеттенүүсүн кароого мүмкүндүк берет жана алардын ширетүү ваннаны түзүүгө жана ошонусу менен ширетүү тигишине кошкон салымын баалоого мүмкүндүк берет.

Диссертациянын темасы менен негизги илимий-изилдөө иштин байланышы. Диссертациялык иш КР ББИМ (2015-2019ж.) долбоору боюнча жана академик У.Асаналиев атындагы тоо-кен жана тоо-кен технологиялар институтунун «Академик А.Жайнаков атындагы маалыматтык технологиялар жана математикалык моделдөө» кафедрасынын илимий иштер планына ылайык аткарылды.

Изилдөөнүн маселелери жана максаты. Иштин максаты болуп ширетүү процессине таасирленүүчү параметрлерди изилдөө үчүн эки температуралуу көп компоненттүү аргондук жаанын ширетүүчү ваннанын үстүнкү бети менен өз ара айкалышынын математикалык моделин өнүктүрүүнүн тутумдаш маселесин коюу эсептелет.

Коюлган максатка жетүү үчүн төмөнкү маселелери аныкталды жана эсептелип чыкты:

1. Көп фазалык процесстерди эске алуу менен плазмалык ширетүүдөгү туташ маселелердин суроолорунун окуп үйрөнүлүшүн анализдөө, ошол эле учурда алардын математикалык моделдөөсүн анализдөө;

2. Темирдин буулары менен болгон аргондук плазмадагы бөлүкчөлөрдүн өз ара аракеттенүүсүн термодинамикалык моделдөөсүн жүргүзүү, өз ара аракеттенүүнүн ар бир түрү үчүн кагылышуу интегралдарын эсептеп чыгуу, аргон менен темирдин аралашмасынын ташуу коэффициенттерин эсептеп чыгуу, ар кандай концентрациядагы 300-25000К температура аралыгындагы темирдин буулары катышкан аргондук плазманын диффузиялык жана оптикалык касиеттерин эсептеп чыгуу.

3. Иштетилүүчү буюм менен эки-температуралуу көп компоненттүү аргондук жаачанын өз ара аракеттенүүсүндө туташ процесстерди карап чыгуу үчүн МГД теңдемелердин бирдей системин эсептеп чыгуусунун негизинде электрдик жаачалык ширетүүнүн экиченемдик стационардык математикалык моделин өнүктүрүү.

4. Жаачанын столбасында металлдын бууларынын конвективдик диффузиясын жана аноддук металлдын буулануусу менен шартталган плазмалык жаачанын көп компоненттүү түзүмүн эске алуу менен ээрибес электрод менен ширетүүдө жаачалык плазманын жылуулук, газо-динамикалык жана электромагниттик мүнөздөлөрүнүн туташ маселелерин сандык изилдөөлөрүн жүргүзүү.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы:

1. Эки суюктуктук магниттик газдык динамикалык теңдемелердин негизинде иштетилүүчү буюмдун үстүнкү бетиндеги темирдин атомдорунун буулануусун эске алуу менен ширетүүчү ваннадагы эритилген темирдин агымы менен көп компоненттүү аргондук плазманын агымдарынын өз ара айкалышуусунун математикалык модели өркүндөтүлдү. «Электрдик жаача-ширетүүчү ванна» өтүү чегиндеги шарттар коюлду жана ушул шарттардын ширетүүчү ваннага жана жылуулук тең салмактуу эмес көп компоненттүү электрдик жаачанын мүнөздөмөлөрүнө таасирлери сандык изилденди.

2. темирдин буулары катышкан аргондук плазманын иондук түзүмү аныкталды, ар бир өз ара айкалышуучу кош бөлүкчөлөр үчүн кагыгылышуучу интегралдар эсептелип чыкты, жылуулук динамикалык, унаалык, темирдин буулары катышкан жылуулук тең салмактуу эмес аргондук плазманын кинетикалык касиеттери жана зарыл болгон кинетикалык коэффициенттер эсептелип чыкты, темирдин буулары катышкан аргондук плазманын оптикалык касиеттери алынды.

3. Иштетилүүчү буюмдун жана тең салмактуу эмес жаачанын жылуулук физикалык мүнөздөмөлөрүнө плазматрондон турукташтыруучу дубалга чейинки аралыктын жана токтун күчүнүн таасиринин сандык изилденген жыйынтыктары:

а). Токтун күчүн 150 ден 200 ге чейин чоңойткондо электрдик жаачанын ядросунда энергия алмашуунун коэффициентинин сызыктуу эместиги пайда болот жана аргондун атомдорунун экинчи иондошуусуна туура келген температура аралыгында жаачалык плазмада электрдик жаачанын ядросунда температуранын тепкичтик таркатылышына алып келет.

б). Жаачанын узундугу менен турукташтыруучу дубалга чейинки аралыктын катышы $\frac{R}{L} \leq 2$ электроддун жана дубалдын жакындыгы катодду көздөй кайтаруучу агымдардын пайда болушуна алып келет, ал болсо аноддун аймагында жаачанын контрагирленишине жана катоддун аймагында жаачанын кеңейишине алып келээри аныкталды.

4. Буюмдун жана жылуулукта тең салмактуу эмес көп компоненттүү электрдик жаачанын электромагниттик, газодинамикалык жана жылуулук касиеттерине темирдин бууларынын тийгизген таасири сандык изилденген жыйынтыктары. Темирдин бууларынын катышуусу салыштырмалуу төмөнкү температуралар аймагында электрдик өткөрүмдүүлүгүнүн чоңойушуна, токтун жыштыгынын азайышына, жана ошондой эле ширетүүчү ваннанын радиалдык

ченеминин 40% дан ашыгыраак кичирейишине алып келээри жана металлдын эрүүсүнүн тереңдетиши аныкталды.

5. Ширетүүчү ваннанын параметрлерине ээритилген темирдин үстүнкү бетиндеги буулануу процессинин таасиринин сандык эсептөөлөрүнүн жыйынтыктары. Темирдин атомдорунун буулануу эске алуу Лоренцтин электромагниттик күчүнүн өсүүсүнүн эсебинен ширетүүчү ваннага Марангонинин эффектисин азайтат, натыйжада ширетүүчү ваннанын радиалдык ченеминин кичирейишине алып келет, темирдин эрүү тереңдигинин көбөйүшүнө алып келээрдиги табылды. «Плазма-анод» чегинде коюлган шарттар аноддук потенциалдын түшүшү 6-12В аралыгында экендигин аныктоого мүмкүндүк берди, алар адабияттык жана эксперименталдык берилгендиктерге туура келет

Алынган жыйынтыктардын практикалык маанилүүлүгү

Иштелип чыккан модел ширетүү ваннасынын ченемин жана формасын, ээрибес электрод менен ширетүүдө ширетүүчү ваннага жаачалык плазманын жылуулук, газодинамикалык жана электромагниттик мүнөздөмөлөрүнүн таасирин сапаттык анализдөө үчүн колдонулушу мүмкүн.

Алынган жыйынтыктар өндүрүштүк объектилерде электр жаачасынын жардамы менен ширетүүнүн технологиялык процесстерин аткаруу учурунда технологиялык процесстерин жакшыртуу максатында колдонсо болот. Ошондой эле жыйынтыктарды окуу процессинде «Математикалык моделдештирүү» сабагын окутууга сунуштоого болот.

Жактоого чыгарылуучу диссертациянын негизги жоболору:

1. Эки суюктуктук МГД теңдемелеринин бирдей системинин эсептеп чыгарылышынын негизинде жабык көлөмдөгү электрдик жаачалык ширетүүдө иштетилүүчү буюм жана эки-температуралуу көп компоненттүү аргондук жаачанын өз ара аракеттенүүсүнүн туташ процесстерин карап чыгуу үчүн экиченемдүү стационардык математикалык модель.

2. Тең салмактуу эмес плазманын жылуулук динамикалык, унаалык жана кинетикалык коэффициенттерин, түзүмүн аныктоо боюнча темирдин бууларын эске алуу менен көп компоненттүү аргондук плазманын жылуулук динамикалык моделдөөнүн жыйынтыктары.

3. Термикалык тең салмакта эмес чыгымсыз аргондук жаачанын параметрлерине түзөтүү дубалына чейинки аралыктын таасирин сандык изилдөөнүн жыйынтыктары. Жаачанын узундугу менен турукташтыруучу дубалга чейинки аралыктын катышы $\frac{R}{L} \leq 2$ электроддун жана дубалдын жакындыгы аноддун аймагында жаачанын контрагирленишине жана катоддун аймагында жаачанын кеңейишине алып келээри аныкталды. Турукташтыруучу дубалга чейинки аралыктын узарышы жаачанын анодго болгон диффузиялык байланышка алып келет.

4. Ширетүүчү ваннанын жана жаачанын параметрлерине токтун күчүнүн чоңойушунун таасиринин сандык изилдөөлөрүнүн жыйынтыктары. Токтун күчү 150А ден 200А ге чоңойушу менен электрдик жаачанын ядросунда температуралар аралыгында оор бөлүкчөлөрдүн температураларынын монотондуу эмес түрүндөгү аргондун атомдорунун экинчи иондошуусуна туура келет.

5. Ширетүүчү ваннадагы жана көп компоненттүү тең салмактуу эмес плазмадагы жылуулук физикалык процесстерге ширетүүчү ваннанын эриген

металдын үстүнкү бетинен буулануу процессинин таасиринин сандык эсептеп чыгуусунун жыйынтыктары. Металдын бууларынын болушу температуранын салыштырмалуу төмөнкү аймактарында электрдик өткөрүмдүүлүгүнүн чоңоюшуна, токтун жыштыгынын азайышына, ошондой эле ширетүүчү ваннанын радиалдык ченеминин 40% ашык кичирейишине алып келет. Металдын буулары экинчи иондоштуруунун себебинен жана темирдин атомдорунун жылуулук өткөрүмдүүлүгүнүн эсебинен толук газдык жылуулук өткөрүмдүүлүгүн чоңойтот.

6. Ширетүүчү ваннанын параметрлерине эритилген металлдын үстүнкү бетинен буулануу процессинин таасиринин сандык эсептөөлөрүнүн жыйынтыктары. Металдын атомдорунун аноддун үстүнкү бетинен буулануусу Лоренцтин электромагниттик күчүнүн өсүшүнүн эсебинен Марангони эффектисинин таасиринин азайышына, ал ширетүүчү ваннанын радиалдык ченеминин азайышына жана металлдын эрүү тереңдигинин 1,5 мм ге чоңойушуна алып келет. Аноддук потенциалынын азайышы 6-12В аралыгында жатат, ал адабияттык жана эксперименттик берилгендиктерге дал келет.

Издөөчүсүнүн жеке салымы. Диссертацияда келтирилген жыйынтыктар автордун өз алдынча изилдөөлөрүнүн жыйынтыгы. Өздүк салымы болуп жолдорду тандоо жана иштин максатына жетүүчү жолду тандоо, изилдөөлөрдү жүргүзүү, жыйынтыктарды алуу, аларды анализдөө жана жыйынтыктоолорду жазыш, илимий макаларды жазып жарыкка чыгаруу эсептелет.

Иштин максатын аныктоодо жана жыйынтыктарды талкулоодо илимий жетекчиси ф.-м.и.д. Кабаева Г.Дж. катышты. Алынган жыйынтыктарды талкулоодо ф.-м.и.д., академик А. Жайнаков жана ф.-м.и.к., доцент Султангазиева Р.Т. дагы катышышты.

Изилдөөнүн жыйынтыктарын сыноодон өткөрүү. Иштин жыйынтыктары төмөнкү эл аралык конференцияларда билдирилди жана талкууланды:

– «Информационные технологии и математическое моделирование в науке, технике образовании», Бишкек 2016г.;

– «Математические информационные технологии» МПТ-2016 Врнячка Баня, Сербия; Будва, Черногория 05 – 14 сентября 2016г.;

– “Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education” (ciTech-2015) Almaty, Kazakhstan, 2015г.

– XIII Международная конференция «Газоразрядная плазма и ее применение» посвященная 100-летию со дня рождения Академика Михаила Федоровича Жукова 5-7 сентября 2017 года Новосибирск, Россия.

Диссертациянын жыйынтыктарынын толук чагылдырылышын чыгаруу. Изилдөөнүн жыйынтыктары ЖАК КР сунуштаган жана ошондой эле эл аралык конференциялардын эмгектеринде, илимий басмаларда 9 макаларда жарыяланган.

Диссертациянын көлөмү жана түзүмү. Диссертациялык иш 98 аталыштан турган адабияттардын тизмесин жана 57 сүрөттөрдү, 18 таблицаны камтыган, киришүүдөн, 3 главадан турган 150 барактагы машинкага басылган тексттен турат.

Автор академик КР УИА А.Ж. Жайнаковго жана илимий жетекчиси ф.-м.и.д., профессор Г.Д. Кабаевага жана ошондой эле доцент, ф.-м.и.к. Р.Т. Султангазиевага

чогуу жетекчилигине, биргелешкен илимий иш үчүн, жыйынтыктарды чогуу талкулоосу үчүн, диссертациялык иштөөдө баалуу кеңештери үчүн терең ыраазычылык билдирет.

ИШТИН НЕГИЗГИ МАЗМУНУ

Киришүүдө изилдөөнүн актуалдуулугу көрсөтүлгөн, изилдөөнүн маселелери жана максаттары жазылган, жыйынтыктардын практикалык маанилүүлүгү, илимий жаңылыктары көрсөтүлгөн. Жактоого чыгарылуучу жоболор келтирилген.

Биринчи главада электрдик жаачаны теоретикалык жана эксперименталдык изилдөөгө арналган кыскача адабияттык жалпы көрүнүш келтирилген. Бууланууну эске алуу менен иштетилүүчү буюмдагы жана жаачалык плазмадагы процесстерди чогуу кароо үчүн жергиликтүү термикалык тең салмактуу экиченемдүү стационардык математикалык моделин мындан ары дагы өркүндөтүү зарылдыгы көрсөтүлгөн.

Электрдик жаачанын мамычасына газына плазма куруучу негизги газдын иондошуу потенциалынан иондошуу потенциалы төмөнүрөөк болгон газды киргизгенде плазманын нурлануусу жана электрдик өткөрүмдүүлүгү күчөйт, ал электрдик жаачанын жана иштетилүүчү буюмдун ширетүүчү ваннасынын жылуулук физикалык жана гидродинамикалык мүнөздөмөлөрүнө таасирин тийгизет.

Электрдик жаачанын мамычасынын кандайдыр бир бөлүгүндөгү жана аноддун аймагындагы металлдын бууларынын бардыгынан шартталган плазманын көп компоненттүүлүгү. МГД теңдемелеринин бирдей системинин эсептеп чыгарылышынын негизинде жабык көлөмдөгү электрдик жаачалык ширетүүдө иштетилүүчү буюмдун жана эки-температуралык көпкомпоненттүү аргондук жаачалык плазманын өз ара аракеттенүүсүн чогуу кароочу математикалык модель сунушталат.

Аноддун үстүнкү бетинен буулануучу темирдин иондору жана атомдорунун конвективдик диффузиялык теңдемелеринин чыгарылышы катары металлдын бууларынын концентрациясынын таркалышы электрдик жаачанын мамычасында жайгашат.

«Электрдик жаача-ширетүүчү ванна» МГД теңдемелеринин системин эсептөө аркылуу процессиндеги байланыш параметрлерин аныктоочу эсептөө учуру үчүн жана анодго контрагирленген жаачанын байланыш учуру үчүн бардык изилдөөчү белгисиздиктер үчүн чектик шарттар бардык эсептелинуучү аймак боюнча коюлду.

Ширетүүчү жаачанын сунушталган математикалык моделинин белгилүү атмосфералык басымды сүрөттөгөн моделдерден негизги артыкчылыгы ал жаачанын мамычасындагы металлдын бууларынын конвективдик диффузиясын жана аноддук металлдын бууланышы менен шартталган плазмалык жаачанын көп компоненттигин эске алгандыгында. Модель эрибес электрод менен ширетүүдө жаачалык плазманын жылуулук, газодинамикалык жана электромагниттик мүнөздөмөлөрүн сандык анализдөө үчүн колдонулушу мүмкүн жана ошондой эле ширетүүчү ваннага динамикалык жана жылуулук таасирин моделдөө үчүн колдонулушу мүмкүн.

Плазманын жаачалык агымдарын теоретикалык сүрөттөө үчүн болуп жаткан процесстер калыптанган, агымдар ламинардык, октук симметриялык, шоолалануу

көлөмдүү, сырткы магниттик талаа жок, плазмадагы электрондордун пайда болуу ылдамдыгы негизинен иондошуунун күчтүүлүгүнөн жана үч бөлүктүк биригип жупталышынан аныкталат, ал эми индукцияланган токтордун жана холлдук Омдун мыйзамына кошкон салымын карабай койсок болот. Электрондордун максвеллдик таркатылышы ылдамдык боюнча жана толкунданган атомдордун больцмандык таркатылышы энергиялар боюнча, иондоштуруунун ылдамдыгы жана рекомбинациондук процесстери электрондук температура менен аныкталат. Плазма иондошуусу тең салмактуу болуп саналат.

Кабыл алынган берилгендиктер учурда эки суюктуктук МГД теңдемелеринин системасы цилиндрдик координата системинде төмөнкүлөрдү камтыйт:

Электрондордун үзгүлтүксүздүгүнүн теңдемеси:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_e v_e) + \frac{\partial}{\partial z} (n_e u_e) = K_I n_e n_a - K_r n_e^2 n_i \quad (1.1)$$

Радиалдык түзүмү үчүн кыймылдын теңдемеси:

$$\rho v \frac{\partial v}{\partial r} + \rho u \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} - j_z B_\varphi + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu r \frac{\partial v}{\partial r}) - 2\mu \frac{v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} (\mu (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z})) - \frac{\partial}{\partial r} (\frac{2}{3} \mu (\frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z})) \quad (1.2)$$

Аксиалдык түзүмү үчүн кыймылдын теңдемеси:

$$\rho v \frac{\partial u}{\partial r} + \rho u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + j_r B_\varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu r (\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z})) - \frac{\partial}{\partial z} (\frac{2}{3} \mu (\frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z})) + 2 \frac{\partial}{\partial z} (\mu \frac{\partial u}{\partial z}) + S_u \quad (1.3)$$

Электрондордун энергиясын сактоо мыйзамы:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r n_e v_e (\frac{5}{2} k T_e + U_I)] + \frac{\partial}{\partial z} [n_e u_e (\frac{5}{2} k T_e + U_I)] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial z}) + \sigma E^2 - \varphi - B_{ea} (T_e - T) \quad (1.4)$$

Оор бөлүкчөлөрдүн энергиясын сактоо мыйзамы:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [(n_{2i} + n_i + n_a) v \frac{5}{2} k T] + \frac{\partial}{\partial z} [(n_{2i} + n_i + n_a) u \frac{5}{2} k T] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + B_{ea} (T_e - T) \quad (1.5)$$

Максвеллдин теңдемелери:

$$-\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = j_r, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\varphi) = j_z, \quad \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0 \quad (1.6)$$

Омдун мыйзамы:

$$j_r = \sigma E_r, \quad j_z = \sigma E_z \quad (1.7)$$

Металдын бууларынын конвективдүү диффузиясынын теңдемеси:

$$\rho (v \frac{\partial c_m}{\partial r} + u \frac{\partial c_m}{\partial z}) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho D_a \frac{\partial c_m}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho D_a \frac{\partial c_m}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho [\bar{D}_i \frac{\partial c_i}{\partial r} + \bar{D}_{2i} \frac{\partial c_{2i}}{\partial r}]) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho [\bar{D}_i \frac{\partial c_i}{\partial z} + \bar{D}_{2i} \frac{\partial c_{2i}}{\partial z}]) \quad (1.8)$$

бул жерде: n_e, n_a, n_i, n_{2i} -электрондордун, атомдордун, иондордун жана атомдордун эки жолку иондошуусунун концентрациясы, v, v_e -электрондук газдын жана газдын радиалдык ылдамдыгы, u, u_e -электрондук газдын жана газдын аксиалдык ылдамдыктары, T, T_e -оор бөлүкчөлөрдүн жана электрондордун температурасы, K_I, K_r - күчтүү иондоштуруунун жана үч бөлүкчөлөрдүн константалары, $\dot{n}_e = K_I n_e n_a - K_r n_e^2 n_i$ -электрондордун генерациялык

ылдамдыгы, ρ - жыштуулук, μ -илешкектик, λ, λ_e - газдын жылуулук өткөрүмдүүлүк жана электрондук газдын коэффициенттери, σ -электрдик өткөрүмдүүлүгү, φ -шоолалануунун интенсивдүүлүгү, U_I -плазма түзүүчү газдын иондоштуруу энергиясы, P -басымдуулук, j_r, j_z -токтун жыштыгын түзүүчүлөрү, H -азимуттук компоненти менен магниттик талаанын чыңалуусу H_φ, B_φ - магниттик индукция векторунун азимуталдык компоненти, E_r, E_z -радиалдык жана аксиалдык электр талаасынын чыңалуусунун векторунун түзүмдөрү E, k -Больцмандын туруктуулугу, B_{ea} -оор бөлүкчөлөрдүн жана электрондордун ортосундагы энергоалмашуунун коэффициенттери, C_m, C_i, C_{2i} -металлдын плазмасынын мамычасындагы иондордун жана металлдын бууларынын салыштырмалуу массалык концентрациясы, D_a, D_i, D_{2i} -көп компоненттүү плазмадагы бир -жана эки заряддык иондук металлдын атомдордун диффузиялык коэффициенттери.

Берилген теңдемелер системин жабуу үчүн жаачалык плазманын түзүмүнөн жана басымдан, температурадан нурланууга кеткен жоготуу жана ташуу коэффициенттеринин, жылуулук физикалык мүнөздөмөлөрүнүн көз каранды экендигин аныктоо зарыл.

МГД теңдемелер системин төмөнкү өзгөрүлмөлөрдү киргизүү менен «куюнтуктун функциясы» өзгөрүлмөлөрү менен чыгарылат: ω - куюндун чыңалуусу, ψ -токтун функциясы, χ - электрдик токтун функциясы, ал октук симметрия учурунда цилиндрдик координата системинде төмөнкү катыштар менен аныкталат:

$$\omega = \frac{1}{r} (\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r}); \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = \rho u r; \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} = \rho v r; \quad \frac{\partial \chi}{\partial r} = r j_z; \quad -\frac{\partial \chi}{\partial z} = r j_r \quad (1.9)$$

Анда система эллиптикалык түрдөгү алты дифференциалдык теңдемелерге айланат, алар түзүлүшү боюнча бир түрдүү жана каноникалык формада жазылышы мүмкүн:

$$a_n \left[\frac{\partial}{\partial z} (f_n \frac{\partial \psi}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial r} (f_n \frac{\partial \psi}{\partial z}) \right] = \frac{\partial}{\partial r} (b_n \frac{\partial c_n f_n}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (b_n \frac{\partial c_n f_n}{\partial z}) + d_n \quad (1.10)$$

бул жерде f_n белгисиз функциясынын жана a_n, b_n, c_n, d_n теңдемелеринин коэффициенттеринин маанилери таблицанда берилген:

Таблица 1. a_n, b_n, c_n, d_n коэффициенттеринин маанилери

f_n	a_n	b_n	c_n	d_n
ω	r^2	r^3	μ	$-r^2 \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{\mu}{r^3} \frac{\partial \chi^2}{\partial z} - g \frac{\partial \rho}{\partial r} + S_w \right]$
ψ	0	$\frac{1}{\rho r}$	1	$r \omega$
T_e	$\frac{5 k n_e}{2 \rho}$	$r \lambda_e$	1	$r \left[\psi + B_{ea} (T_e - T) + \left(\frac{5}{2} k T_e + U_I \right) \dot{n}_e \right] + \frac{5}{2} k r \left[\left(\frac{1}{\sigma r} \frac{\partial \chi}{\partial r} - D_{ad} \frac{\partial n_e}{\partial z} - \frac{n_e D_T}{2 T_e} \times \frac{\partial T_e}{\partial z} \right) \frac{\partial T_e}{\partial z} - \left(\frac{1}{\sigma r} \frac{\partial \chi}{\partial z} + D_{ad} \frac{\partial n_e}{\partial r} + \frac{n_e D_T}{2 T_e} \frac{\partial T_e}{\partial r} \right) \frac{\partial T_e}{\partial r} \right] - \frac{1}{\sigma r} \left[\left(\frac{\partial \chi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \chi}{\partial r} \right)^2 \right]$
T	$\frac{5 k}{2 m}$	$r \lambda$	1	$-B_{ea} (T_e - T) r$

χ	0	$\frac{1}{\sigma r}$	1	0
C_m	$\frac{1}{r}$	ρD_a	1	$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho \left[\bar{D}_l \frac{\partial C_l}{\partial r} + \bar{D}_{2l} \frac{\partial C_{2l}}{\partial r} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \left[\bar{D}_l \frac{\partial C_l}{\partial z} + \bar{D}_{2l} \frac{\partial C_{2l}}{\partial z} \right] \right)$

Бирдей формада жазылышы теңдемелер системин эсептөөдө эсептөөнүн бир эле алгоритмин колдонууга мүмкүндүк берет. Теңдемелер системи эллиптикалык түрдөгү теңдемелер болгондуктан чектик шарттар эсептелүүчү аймакты камтыган бардык контур боюнча берилиши зарыл.

Эсептөөлөр R аралыгындагы капталдык дубал менен чектелген, система жабык көлөмдө жайгашкан, анод болуп иштетилүүчү буюм кызмат кылат, жалпак капталы менен болгон цилиндрдик формадагы ээрибес катоду болгон чыныгы плазматрондун схеми үчүн жүргүзүлөт.

Чектик шарттар берилген системдер үчүн төмөндөгүдөй коюлду:

$$1. \quad \text{катоддун капталында: } \psi = 0; \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0; \frac{\partial T_e}{\partial z} = 0; T = T_k(r); n_e = n_e(r, z_k);$$

$$\chi_k = \frac{i}{2\pi \int_0^{R_k} \sigma r dr} \times \int_0^r \sigma r dr; C_m = 0; \quad (1.11)$$

бул жерде $T_k(r) = (T_{\text{кип}} - T_0) \left(1 - \frac{r}{R_k}\right)^m + T_0$, $T_{\text{кип}}$ – катоддук материалынын кайноо температурасы, m – температуранын профилдин толтуруу даражасы, R_k – катоддук тактын радиусу.

2. Жаачанын мамычасынын огунда симметриялык шарты аткарылат:

$$\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0; \psi = 0; \frac{\partial T_e}{\partial r} = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \frac{\partial n_e}{\partial r} = 0; \chi = 0; \frac{\partial C_m}{\partial r} = 0; \quad (1.12)$$

3. Плазматрондун сырткы чегинде жана катоддун каптал чегинде газдын жабышкан шарты жана дубалдын өткөрбөстүк шарты аткарылат, электрондук температуранын адиабаттык шарты, оор бөлүкчөлөрдүн температурасы дубалдын температурасына барабар

$$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0; \psi = 0; \frac{\partial T_e}{\partial r} = 0; T = T_0; n_e = n_e(T_e); \chi = \frac{i}{2\pi}; C_m = 0; \quad (1.13)$$

4. Иштетилүүчү буюмдун ылдыйкы чегинде:

$$w = 0; \psi = 0; T = T_0; \frac{\partial \chi}{\partial z} = 0; \quad (1.14)$$

5. Иштетилүүчү буюмдун каптал чегинде:

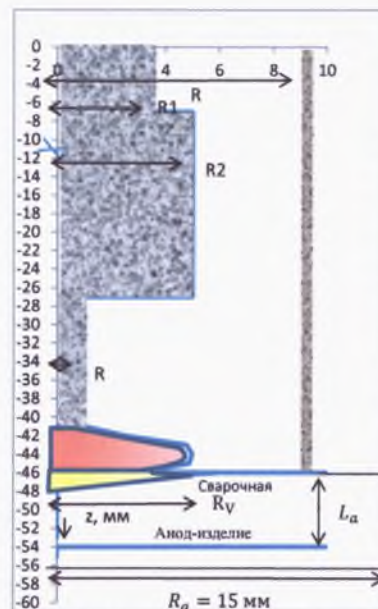
$$w = 0; \psi = 0; T = T_0; \chi = \frac{i}{2\pi}; \quad (1.15)$$

Электроддордун аймагында электрондук газ жок, электрондордун температурасы дагы концентрациясы дагы эсептелбейт. Аноддун аймагында металлдын бууларынын конвективдик диффузия теңдемелери эсептеп чыгарылбайт.

– «жаача-анод» чегин эки аралашпас суюктуктарды бөлүүчү горизонталдык сызыгы деп эсептейбиз, башкача айтканда $\psi = 0$.

– «куюндун чыңалуусу» өзгөрүлмөсү үчүн электрдик жаачанын илешкекти агымдарынын ширетүү ванна менен өз ара аракеттениши жана Марангони эффектиси эске алынат:

$$\mu_p \frac{\partial v_p}{\partial z} = \mu_{an} \frac{\partial v_{an}}{\partial z} - \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad \text{т.с.} \quad \mu_p W_p r = \mu_{an} W_{an} r - \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (1.16)$$



Сүрөт 1.1. Эсептелүүчү аймактын схемасы

J_a -аноддун үстүнкү бетиндеги токтун жыштыгы, σ_ϵ – Стефан-Больцман коэффициентти, ϵ – аноддун шоолалануу кубаттуулугу, h_{fg} – буулануунун бөлүктүк жылуулугу, W_v – буулануу ылдамдыгы, ал кийинки жакындатуудан табылат: $\log W_v = A_v + \log P_{atm} - 0,5 \log T$, A_v – иштетилүүчү буюмдун материалынан көз каранды болгон туруктуу, P_{atm} – атмосфералык басым.

Температурасы ээрүү температурасынан жогору болгон аноддун үстүнкү бетиндеги металлдын бууларынын концентрациясы төмөнкүдөй аныкталат:

$$C_m = \frac{p_v M_{Fe}}{\rho k T_{an}} \quad (1.18)$$

бул жерде p_v – металлдын каныккан бууларынын басымы, ал ширетүү ваннасынын үстүнкү бетинин T_{an} температурасынын функциясы болот:

$$p_v = P_{atm} \exp \left(\frac{A_\varphi}{k} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_0} \right) \right)$$

бул жерде T_b – кайноо температурасы; A_φ – аноддун металынын чыгуу иши.

Электрдик токтун сызыктары ортогоналдуу

$$\frac{\partial \chi_p}{\partial z} = \frac{\partial \chi_{an}}{\partial z}, \quad (1.19)$$

Эсептөө ыкмасы

МГД теңдемелер системинин чыгарылышы акыркы айырмалар ыкмасы менен жүргүзүлөт. Эсептелүүчү аймак $\{r_j: j = 0, 1, \dots, MR * z_i: i = 0, 1, \dots, MZ\}$ ченеминдеги түз сызыктуу ортогоналдык бирдей ченемдеги эмес тор менен жабылат.

бул жерде “p” индексиси плазмалык жаачага тиешелүү, “an” – индексиси аноддун материалына тиешелүү.

– плазма-суюк металл» чегинде температура үчүн шарттарды коюуда аноддун үстүнкү бетинде жылуулук агымы электрондор жана оор бөлүкчөлөр аркылуу түзүлөөрү, ал эми ширетүү ваннасынын үстүнкү бетиндеги жылуулук жоготуулар радиациондук жоготууларды жана бууланууга кеткен жоготууларды камтышы эске алынат:

$$\lambda_{ep} \frac{\partial T_{ep}}{\partial z} + \lambda_p \frac{\partial T}{\partial z} + j_a \frac{k}{e} \left(\frac{5}{z} - D_T \right) T_{ep} = \lambda_{an} \frac{\partial T}{\partial z} + j_a \varphi_0 - \sigma_\epsilon \epsilon (T_a^4 - T_0^4) - W_v h_{fg}, \quad (1.21)$$

бул жерде $\varphi_0 =$

$$\frac{k T_e}{e} \ln \left(\frac{e n_e \sqrt{\frac{k T_e}{\pi m_e}}}{4(j_a + j_{Ar} + j_{Ar^{++}} + j_{Fe} + j_{Fe^{++}})} \right)$$

аноддун үстүнкү бетине салыштырмалуу плазманын потенциалы

Интегро-интерполяциялык ыкма менен каноникалык теңдемелер (1.10) баштапкы функция менен төрт кошуна түйүндөрүндө жайгашкан маанилери болгон беш чекиттүү айырмалар схемасынын түйүнүндө байланыштырган сызыктуу алгебралык теңдемелер системине келтирилет:

$$\varphi_{i,j}^v = a(\varphi_{i-1,j}^{v-1} + \varphi_{i+1,j}^{v-1} + \varphi_{i,j-1}^{v-1} + \varphi_{i,j+1}^{v-1} + D_{i,j}) + (1-a)\varphi_{i,j}^{v-1},$$

бул жерде v – итерация номери; $F_{i,j}$ – коэффициенттер; $D_{i,j}$ – бош мүчөсү; $0 < a \leq 1$ – ылдыйкы релаксациясынын параметри. Итерациондук процесстин аяктоосунун шарты: $\max_{i,j} \left| \frac{\varphi_{i,j}^v - \varphi_{i,j}^{v-1}}{\max|\varphi_{i,j}^{v-1}|} \right| < \varepsilon$.

Экинчи главада плазманын унаалык жана оптикалык касиеттерин, термодинамикалык функцияларын, иондоштурулган түзүмүн аныктоочу маселеси чыгарылган. Эсептеп чыгаруулар нейтралдык, бир жана эки эсе иондоштурулган темирдин жана аргондун атомдорун, электрондорду камтыган темирдин буулары кошулган аргондук плазма үчүн жүргүзүлдү. 300дөн 25000К температуралык аралыктагы, $P=101325\text{Па}$ учурундагы тең салмактуу компоненттүү аныктоо маселеси чечилди.

Ширетүүчү ваннадагы көп компоненттүү плазмада металлдын бууларынын камтылышы төмөндөгүдөй аныкталат:

• Плазманын түзүмүн аныктоо үчүн плазманын ар бир түзүмүнүн түзүмү үчүн плазманын идеалдуу эместигин эске алуу менен Саханын теңдемесин колдонуу:

$$\frac{n_e n_{\alpha Z}}{n_{\alpha}} = 2 \frac{\theta_{\alpha Z}}{\theta_{\alpha}} \left(\frac{2\pi m_e k T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{\alpha Z} - \Delta E_{\alpha Z}}{k T_e}\right)$$

бул жерде $(\alpha Z = Ar^+, Ar^{++}, Fe^+, Fe^{++})$, n_{α} – нейтралдык атомдордун концентрациясы; θ_{α} , $\theta_{\alpha Z}$ – атомдор жана иондор үчүн статистикалык суммалар α ; h – Планка туруктуулугу; m_e – электрондун салмагы, $E_{\alpha Z}$ – α бөлүкчөсүнүн Z абалынан $Z + 1$ заряддык абалына өтүү үчүн иондошуу энергиясы; $\Delta E_{\alpha Z}$ – плазманын заряддалган бөлүкчөлөрүнүн өз ара айкалышынан шартталган иондошуу энергиясынын азайышы;

• $E_{\alpha Z}$ Дебай-Хюккелдин жакындаштыруусунда бааланат: $E_{\alpha Z} = \frac{(Z+1)e^2}{4\pi\epsilon_0 r_D}$;

• Дебай радиусу: $r_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 k T_e}{e^2(n_e + n_{Ar^+} + 4n_{Ar^{++}} + n_{Fe^+} + 4n_{Fe^{++}})} \left(\frac{T_e}{T} + 1\right)}$,

ϵ_0 – диэлектрик туруктуу;

• Дальтон мыйзамы: $P = n_e k T_e + (n_{Ar} + n_{Fe} + n_{Ar^+} + n_{Ar^{++}} + n_{Fe^+} + n_{Fe^{++}}) k T$

• Квазинейтралдык күтүүчүлүк: $n_e = n_{Ar^+} + 2n_{Ar^{++}} + n_{Fe^+} + 2n_{Fe^{++}}$

Аргондуктагы темирдин мазмуну: $C_m = \frac{n_{Fe} + n_{Fe^+} + n_{Fe^{++}}}{n_{Ar} + n_{Ar^+} + n_{Ar^{++}} + n_{Fe} + n_{Fe^+} + n_{Fe^{++}}}$

Темир үчүн $\theta_{\alpha Z}$ Планка-Ларкина формуласы боюнча эсептелди

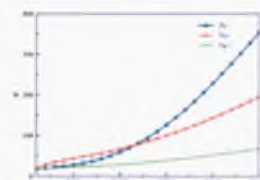
$$\theta_{\alpha Z} = \sum_{m=1}^{m_{\max}} g_m \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \quad (2.2)$$

бул жерде g_m – E_m энергиясы менен m – чи электрондук деңгелиндеги статистикалык салмак. Статистикалык сумманы чыгарууда бардык белгилүү болгон энергетикалык деңгээлдеги суммасы эсептелди: (Fe) темирдин атомдору

үчүн $n=479$, (Fe^+) темирдин бир эсе иондоштурулган атомдору үчүн $n=412$ жана (Fe^{++}) темирдин бир эсе иондоштурулган атомдору үчүн $n=564$.

7 компоненттүү плазманын түзүмүн чыгаруу үчүн 12 белгисиз параметрлери болгон 12 теңдемеге эзоблобуз: n_e , n_{Ar} , n_{Ar^+} , $n_{Ar^{++}}$, n_{Fe^+} , $n_{Fe^{++}}$, n_{Fe} , ΔE_{Ar^+} , $\Delta E_{Ar^{++}}$, ΔE_{Fe^+} , $\Delta E_{Fe^{++}}$, r_D .

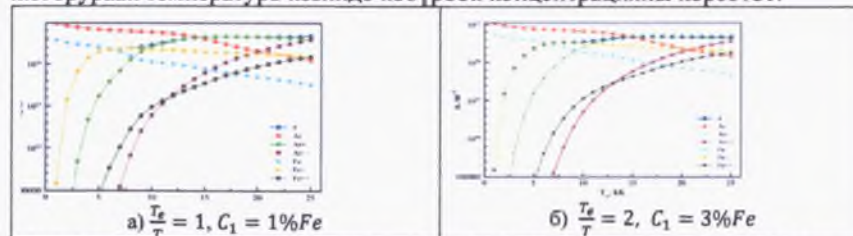
Системдин чыгарылышы дал келүүсү үчүн ылдыйкы релаксация ыкмасын колдонуу менен Ньютон-Рапсондун ыкмасы менен итерациялык аткарылышы мүмкүн.



Сүрөт 2.1. Темирдин статистикалык суммасынын

2.1 сүрөттө 1000ден 25000ге чейинки температуралар аралыгындагы статистикалык суммалардын жыйынтыктары көрсөтүлгөн.

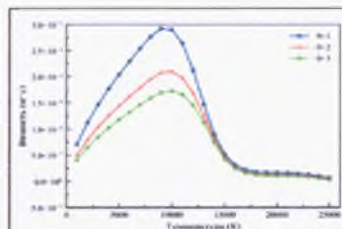
Атмосфералык басым учурундагы темирдин бууларынын 1% камтыган учурундагы аргондук эки температуралуу тең салмактуу плазманын түзүмүнүн эсептеп чыгарылышы сүрөт 2.2. берилди. Темирдин иондору 5500К, (иондошуу потенциал 7,68 эВ) болгон учурда пайда боло башташат, ал эми Ar иондору (биринчи иондошуу потенциал 15,75 эВ) жогорураак температура кезинде көбүрөөк концентрацияны көрсөтөт.



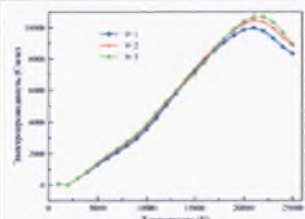
Сүрөт 2.2. Ар кандай пайыздагы темирди камтыган аргондук плазманын түзүмү, $P=1\text{атм}$.

Классикалык жана квантово-механикалык эсептөөлөрдүн негизинде термодинамикалык коэффициенттер - жыштык, темирдин буулары менен болгон аргондук плазманын жылуулук сыйымдуулугу жана энтальпия аныкталды. Унаалык коэффициенттерди эсептөөдө өз ара аракеттенишүүчү бөлүкчөлөрдүн бардык жуптары үчүн кагылышуу интегралдарын эсептеп чыгуу талаптанат, алар өз ара аракеттенишүүчү потенциалы менен сүрөттөлөт. Нейтралдык атомдордун өз ара аракеттенишүүсүн кароодо Леннард-Джонстон потенциалы колдонулду, атомдун өзүнүн иону менен өз ара аракеттенишүүсүндө ийкемдүү ошондой эле ийкемдүү эмес өз ара аракеттенишүү процесстери эске алынды башкача айтканда резонанстык кайра заряддоо, эки заряддык иондордун өздөрүнүн атомдору менен болгон өз ара аракеттенишүүсү поляризацияондук потенциалдын жакындашуусунда каралды, атомдордун башка иондор менен кагылышуусу башкача айтканда поляризацияондук потенциал, заряддалган бөлүкчөлөрдүн өз ара аракеттенишүү потенциалы Дебай-Хюккелдин теориясына ылайык айланадагы иондордун жана электрондордун заряддык талааларын экрандоосун эске алуу менен алынды.

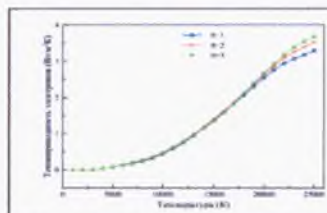
Ташуу коэффициенттери Чепмен-Энскогдун жогорку жакындатуучу методун эске алуу менен эсептелди жана анын жыйынтыктары 2.3-2.6 сүрөттөрдө келтирилди.



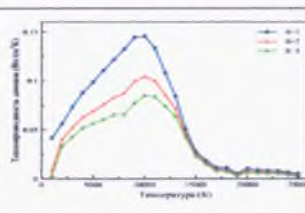
Сүрөт 2.3 Илешкектик ($C_{Fe}=0.001\%$)



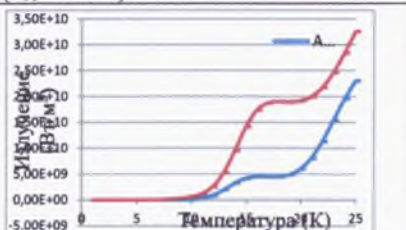
Сүрөт 2.4 Электрдик өткөрүмдүүлүк ($C_{Fe}=0.001\%$)



Сүрөт 2.5. Оор бөлүкчөлөрдүн жылуулук өткөрүмдүүлүгү жана электрондук жылуулук өткөрүмдүүлүгү ($C_{Fe}=0.001\%$).



Сүрөт 2.6 . Амбиполардык диффузия ($C_{Fe}=0.001\%$).



Сүрөт 2.7. Темирдин буулары менен болгон аргондук плазманын нурлануусу ($C_{Fe}=0.01\%$).

Жалпы түрүндө, үзгүлтүксүз спектр жана атомдук жана иондук спектралдык сызыктар үчүн радиациондук жоготуулар кийинки формула менен эсептелет:

$$\varphi(T_e) = \frac{4\pi}{(4\pi\epsilon_0)^3} \frac{16\pi e^6}{6\pi m_e^3 k} \sum_{ion} \frac{n_e n_i}{\sqrt{T_e}} z_i^2 \frac{4kT_e}{h} + \sum_{\lambda_{kl}} \frac{hc}{\lambda_{kl}} n_j \frac{g_k}{U_j} \exp\left(-\frac{E_k}{kT_e}\right),$$

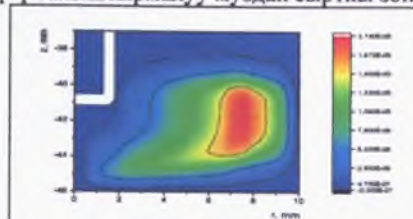
Темирдин атомдору үчүн толкундун узундуктарынын 300 дөн 25000 Å чейинки аралыгында эсептелип чыкты. Темирдин иондору жана атомдору үчүн өтүү мүмкүнчүлүктөрүн эсептеп чыгарууга зарыл болгон абсорбциянын сызыктык коэффициенттеринен (3, 4, 9, 10 пдф) алынды. Алар 42934 өтүүдөн турат: 15096 FeI өтүүсү үчүн, 18448 темирдин ионунун өтүүсү үчүн, 9390 Fe III үчүн.

Эсептөөлөрдүн жыйынтыктары 2.7 сүрөттө келтирилди.

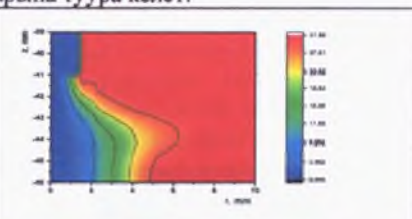
Үчүнчү глауда жогоруда сүрөттөлгөн модел боюнча сандык изилдөөлөрдүн жыйынтыктары келтирилди. Эки температуралуу көп компоненттүү аргондук плазманын сандык изилдөөлөрү: - ширетүүчү ваннанын агымдарын менен өз ара аракеттенишин эске албаган учур; - буулануусу жок ширетүүчү ванна менен жаачанын процесстерин чогуу караган учур; - көп компоненттүү плазманын физикалык процесстерине аноддук металлдын бууларынын таасири изилденди; - ширетүүчү ваннадагы жана жаачадагы процесстерге токтун күчүнүн жана түзөтүүчү дубалдын таасирлери изилденди;

Эсептөөлөр токтун күчү 150, 200 А, басым $P=0,1$ МПа болгон учурларга жүргүзүлдү. Катоддогу жаачанын ченеми цилиндрдик электроддун ченемине барабар жана 3.5 мм ге барабар. Катоддук тактын борборундагы температура 18000К. Катоддун капталдык дубалы жана түзөтүүчү дубалы $T=300$ К температура учурунда колдоо болот. Түзөтүүчү дубалга чейинки аралык 10мм ден 12мм ге чейин өзгөрөт. Оң анод болуп, каптал жактары жана ылдыйкы бөлүгү 300К температурада колдоо жүргүзүлгөн темирди өтө көп камтыган горизонталдык стальдык пластина эсептелет. Аноддун жылуулук физикалык касиеттери температурадан көз каранды, металлдын жашыруун эрүү жылуулугу энтальпияда эске алынган.

3.1 жана 3.2 сүрөттөрдө ширетүүчү ванна менен өз ара аракеттенишин эске албаган учурдагы плазматрондун ылдыйкы бөлүгүндөгү электрдик токтун сызыктары жана газдын бирдей сарпталыш сызыктары берилген. Плазманын агымдары анодго келет жана жылуулукту аноддун огунун аймагынан сыртка чыгарууну салымдап радиалдык багытта агат. Бул анод жакта изотермалардын коюуланушына жана аларды жаачанын көрүнүктүү чегин мүнөздүү болгон «колокол типтеги» форманы түзүп радиалдык багытта чоет. Жогорку температурадагы октун айланасындагы зона аркылуу агымдын көп эмес бөлүгү өтөт, газдын сарпталышынын дээрлик көпчүлүк бөлүгү салыштырмалуу муздак сырткы зоналарына туура келет.

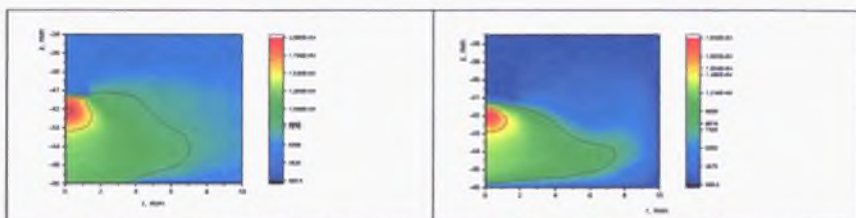


Сүрөт 3.1. Газдын бирдей сарпталыш сызыктары (мг/сек), ЛТР, $I=150$ А.



Сүрөт 3.2. Электрдик токтун сызыктары, $I=150$ А, $R=10$ мм

3.3 сүрөттө ширетүүчү ваннаны эске албагандагы оор бөлүкчөлөрдүн жана электрондордун температуралык талаалары келтирилди. Электрондордун температуралык талааларын курууда биринчиден электрдик токтун сызыктарынын сүрөтү таасирин тийгизет. Жогоруда айтылгандай оор бөлүкчөлөрдүн температуралык талаалары газодинамикалык жана электромагниттик күчтөрдүн өз ара аракеттениш таасиринен курулат. Жаача плазмалык мамычасынын борбордук бөлүгүндө дээрлик жылуулук тең салмактуулукта, байкалуучу тең салмактуулук эместик анын коэффициенти θ 5-6 барабар болгондо жаачанын тегерегинде жана анодго жакын жактарда пайда болот. Плазма жаачасы өтө иондоштурулган, электрондордун жыштыгы үчүн 10^{23} м⁻³ маанилер алынды.

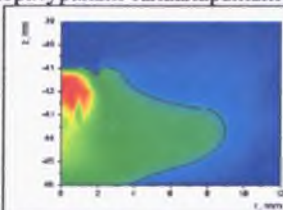


Сүрөт 3.3 Электрондордун (а) жана оор бөлүкчөлөрдүн (б) температураларынын таркатылышы, $I=150\text{ A}$ (1 вариант), $R=10\text{ мм}$

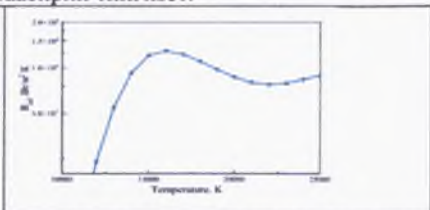
T жана Te аралыгындагы катышы электрдик талаанын электрондор менен өз ара аракеттенишинен жана кагылыш процесстеринен аныкталат. Электрондордун температураларынын профилдери оор бөлүкчөлөргө салыштырганда электрондордун жылуулук өткөрүмдүүлүгү кадыр эсе төмөн болгондуктан төмөнүрөөк радиалдык градиенттерге ээ болушат, ошондуктан электрондордун жылуулукту сыртка ташуусу оор бөлүкчөлөрдүкүнө караганда төмөн. Оор бөлүкчөлөрдүн температураларынын радиалдык градиентин билип жаачанын агыш эффективдүүлүгүнө таасирин тийгизген плазматрондун дубалдарына аккан жылуулук агымдарды аныктаса болот. Кыска жаача шартында энергиянын дээрлик бөлүгү капталдык дубалдарга салыштырганда анодду карай өтүшөт.

Түзөтүүчү дубалга чейинки аралыкты 10 мм ден 12 мм ге чейин узартканда токун күчү $I=150\text{ A}$ болгон учурда температуралардын изолиниялары радиалдык багытта көбүрөөк созулган, себеби толук ток шарты октон 10 мм ге салыштырганда узунураак аралыкта аткарылат.

3.4 сүрөттө көрсөтүлгөндөй токун күчүнүн 150A ден 200A ге чоңойушу менен энергия алмашуу коэффициентинин сызыктуу эместиги пайда болуп ядродо температуранын таркатылышы тепкичтүү түрдө болот, ал аргондун экинчи иондошуусуна туура келет. Оор бөлүкчөлөрдүн бирден бир жылыныш булагы болуп электрондор менен ийкемдүү кагылышы болот, ошондуктан аймактагы энергия алмашуунун коэффициентинин мүнөзү түздөн түз оор бөлүкчөлөрдүн температуралык талааларынын түзүлүшүнө таасирин тийгизет.

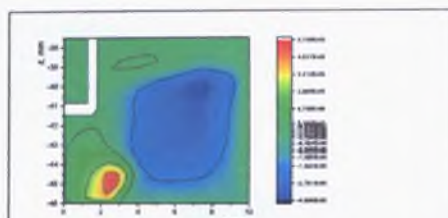


Сүрөт 3.4 Оор бөлүкчөлөр температурасы, $I=200\text{ A}$, $R=12\text{ мм}$

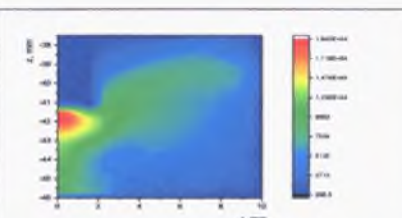


Сүрөт 3.5 Энергия алмашуу коэффициенти, $I=200\text{ A}$, $R=12\text{ мм}$

Жаачанын процесстери менен аноддон бууланууну эске албаган ширетүүчү ваннаны чогуу караган учурда коюлган чектик шарттар электрдик жаачанын мамычасында гидродинамикалык агымдарга дээрлик таасирин тийгизет.



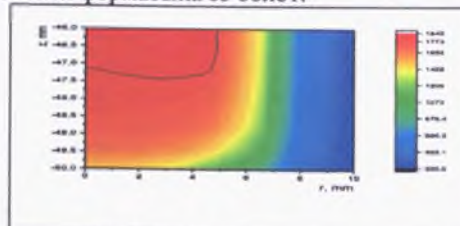
Сүрөт 3.6 Электрдик жаача столбасындагы газдын бирдей сарптталыш сызыктары, $I=150\text{ A}$, $R=10\text{ мм}$



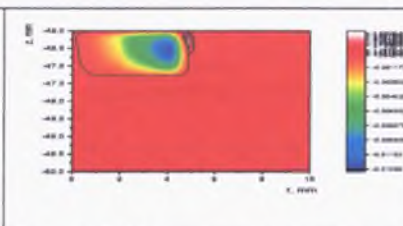
Сүрөт 3.7 Оор бөлүкчөлөрдүн температураларынын таркатылышы, $I=150\text{ A}$, $R=10\text{ мм}$

Суюк металлдын илешкектиги плазманын илешкектигинен бир нече катарга бийик, ошондуктан плазманын радиалдык багыттагы кыймылын токтотот жана ширетүүчү ваннанын кырынан чагылдырылган агым-катодду көздөй багытталган аноддун үстүндө тескери куюн пайда болот. Октуң айланасында электромагниттик күчтөн оң куюн түзүлөт, ал эми катоддун дубалы жакта терс куюн менен өз ара аракеттенишинен чоң эмес оң куюн байкалат. Илешкектик сүрүлүү күчү бул куюндардын арасындагы газды кыймылга тартат жана катоддун аймагында жаача радиалдык кеңейет (Сүрөт 3.6). Мындай гидродинамикалык агымдар кийинки оор бөлүкчөлөрдүн жылуулук сүрөтүн (Сүрөт 3.7): жаача мамычасы ширетүүчү ваннанын үстүндө контрагирленет жана жаачанын мамычасы катоддун үстүнкү бөлүгүндө кеңейет. Илешкетик негизинен оор бөлүкчөлөрдүн агымдарынын мүнөзүнөн аныкталгандыктан электрондордун температуралык талаалары байкалуудай өзгөрбөйт.

Түзөтүүчү дубалдарга чейинки аралыкты 12мм ге чейин чоңойткондо жылуулукту радиалдык багытта алып чыгууга таасирин тийгизген конвективдик агымдардын таасири чоңойот жана жаача аноддун аймагында кеңейет дагы колокол формасына ээ болот.



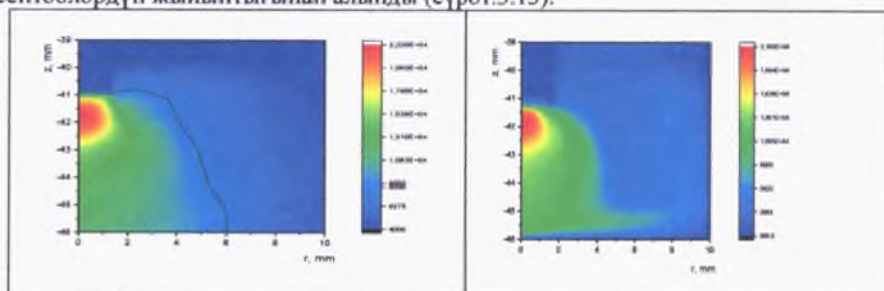
Сүрөт 3.8 Ширетүүчү ваннанын изотермалары, $I=150$, $R=10\text{ мм}$



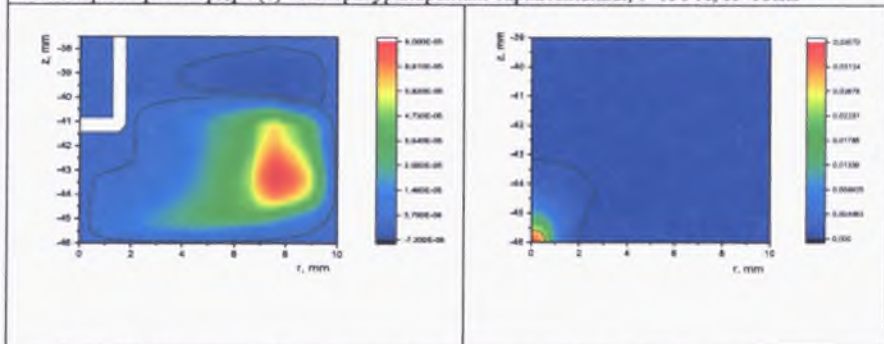
Сүрөт 3.9 Ширетүүчү ваннадагы суюк металлдын бирдей сарптталыш сызыктары, $I=150\text{ A}$, $R=10\text{ мм}$

3.8-3.9 сүрөттөрдө буюмдагы эритилген металлдын бирдей сарптталыш сызыктары жана температуралык талаалар келтирилген. Ширетүүчү ваннанын көлөмүндө плазманын агымдары менен өз ара аракеттенишинен ваннанын борборунан анын четине багытталган негизги куюн түзүлөт, ваннанын четинде Марангонинин эффектисинен карашы багытталган экинчи куюн түзүлөт. Ал куюн октуң тегерегине салыштырмалуу ширетүүчү ваннанын чет жагында көбүрөөк терең эришине жардам берет.

$R=10\text{мм}$, $I=150\text{А}$ үчүн бууланууну эске алган учурдагы жыйынтыктарда электрдик жаача колокол формасында болот, ширетүүчү ваннанын үстүнкү бетинде концентрациясы 0.035% болгон темирдин бууларынын атомдору пайда болот, буулар көбүнчө плазманын агымдарынын огунун жанында болоору сандык эсептөөлөрдүн жыйынтыгынан алынды (сүрөт.3.13).

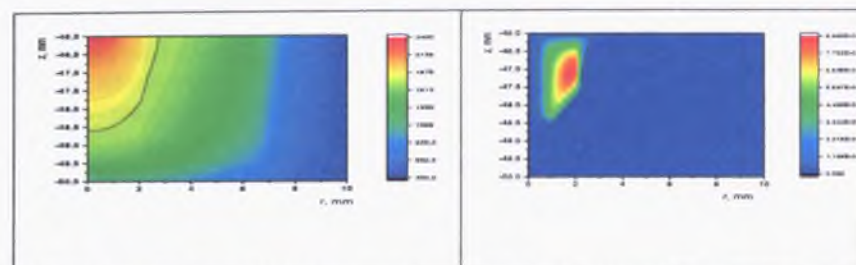


Сүрөт 3.10. Темирдин буулары менен болгон аргондун плазмасындагы электрондордун (а) жана оор бөлүкчөлөрдүн (б) температураларынын таркатылышы, $I=150\text{ А}$, $R=10\text{ мм}$



Сүрөт 3.11 Темирдин буулары менен болгон аргондук плазманын газынын бирдей сарпталыш сызыктары, Ширетүүчү ваннанын столбасындагы металлдын бууларынын концентрациясы, $I=150\text{ А}$, $R=10\text{ мм}$

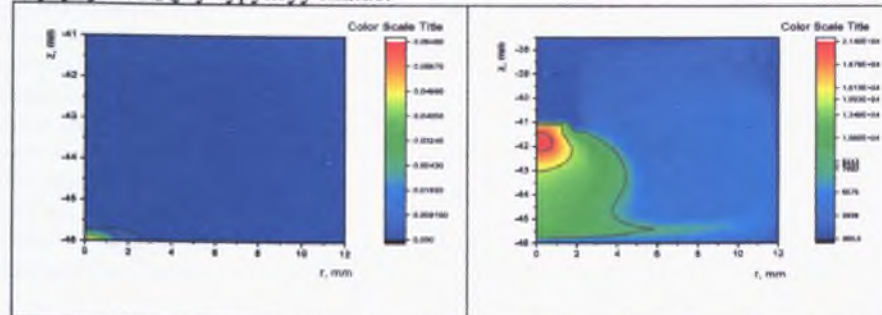
Ширетүүчү ваннанын огундагы температура бууланууну эске алганда 2200К ди түзөт, ал эми бууланууну эске албаганда 1870К ди түзөт (сүрөт 3.11). Ширетүүчү ваннанын үстүнкү бетинде атомдордун буулануусу ЛТР моделиндегидей ширетүүчү ваннанын үстүнкү бетинин муздашына алып келет, терс агымдын болгондугу ширетүүчү ваннанын үстүнкү бетинин муздатат. Металлдын бууларынын болушу салыштырмалуу төмөнкү температура аймагында электрдик өткөрүмдүүлүктү чоңойтот, ал мамычанын ток өткөрүмдүүлүк радиусун кичирейтет, ошондой эле ширетүүчү ваннанын радиалдык ченеминин кичирейишине алып келет. Октун аймагында токтун жыштыгы күчөйт, андан металлдын эрүү тереңдиги чоңойот. Ваннанын четинде терс куюн байкалбайт, башкача айтканда буулануу Марангони эффектисин азайтат.



Сүрөт 3.12 Темирдин буулары менен болгон аргондук плазманын газынын бирдей сарпталыш сызыктары жана изотермалар, $I=150\text{ А}$, $R=10\text{ мм}$

Түзөтүүчү дубалдарга чейинки радиалдык аралыкты чоңойткондо конвективдик агымдардын таасири чоңойот, 3.13 сүрөттө көрсөтүлгөндөй жаачанын касиетине металлдын бууларынын таасир тийгизген зонасы радиалдык кеңейет, бирок аксиалдык азаят. Так ушул аймакта 3.14 сүрөттө көрсөтүлгөндөй жаачанын мамычасынын негизделишинде кичирейишине алып келүүчү плазманын жылуулук физикалык касиетинин өзгөрүшү пайда болот. Жаачанын калган жактарында темирдин кичикей концентрациясы плазманын параметрлерине таасир тийгизбейт.

Аргондук плазмада металлдын бууларынын болушу темирдин атомдорунун жылуулук өткөрүмдүүлүгүнөн толук газдык жылуулук өткөрүмдүүлүк чоңдугу чоңойот, анын натыйжасында аноддун айланасындагы катмарда разряддын кысылышы күчөйт. Кийинки токтун чоңойушу менен разряд электрондук жылуулук өткөрүмдүүлүгүнүн үстөмдүк режимине өтөт, жана контракция радиусунун чоңдугу туруктуу кылат.



Сүрөт 3.13. Жаачанын мамычасындагы темирдин бууларынын концентрациясы, $I=150$, $R=12\text{ мм}$

Сүрөт 3.14 Оор бөлүкчөлөрдүн температурасы, $I=150$, $R=12\text{ мм}$

Аноддун үстүндөгү токтун жыштыгытары электрдик токтун функциясынын аныктамасынан (1.9) келип чыгат, жана эсептелинген жалпы потенциалдын кичирейиши 6 дан 12 Вольт ко чейинки аралыкта жатат, жана адабияттык жана эксперименталдык берилгендиктерге туура келет.

ЖЫЙЫНТЫКТАР

Диссертациялык иштин негизги жыйынтыктары төмөндөгүдөй:

1. Магниттик газодинамикалык эки суюктуктук теңдемелер негизинде иштетилүүчү буюмдун үстүнкү бетиндеги металлдын буулануу процессин эске алгандагы ширетүүчү ваннадагы эриген металлдын агымдары менен көп компоненттүү аргондук плазманын агымдарынын өз ара аракеттенүүчү математикалык модели өркүндөтүлдү.

2. Термодинамикалык моделдөө жүргүзүлдү, темирдин буулары менен болгон аргондук плазманын иондошуу түзүмү аныкталды, ар бир түр үчүн кагылышуу интегралдары эсептелди, термодинамикалык, кинетикалык коэффициенттери, темирдин буулары менен болгон аргондук плазманын оптикалык касиеттери алынды.

3. Иштетилүүчү буюмдун жана тең салмактуу эмес жаачанын жылуулук физикалык мүнөздөмөлөрүнө плазматрондон турукташтыруучу дубалга чейинки аралыктын жана токтун күчүнүн таасиринин сандык изилдөөлөрү жүргүзүлдү. Токтун күчүн 150 дөн 200 гө чейин чоңойткондо электрдик жаачанын ядросунда энергия алмашуунун коэффициентинин сызыктуу эместиги пайда болот жана аргондун атомдорунун экинчи иондошуусуна туура келген температура аралыгында жаачалык плазмада электрдик жаачанын ядросунда температуранын тепкичтик таркатылышы аныкталды. Жаачанын узундугу менен турукташтыруучу дубалга чейинки аралыктын катышы $\frac{R}{L} \leq 2$ электрдун жана дубалдын жакындыгы катодду көздөй кайтаруучу агымдардын пайда болушуна алып келет, ал болсо аноддун аймагында жаачанын контрагирленишине жана катоддун аймагында жаачанын кеңейишине алып келээри табылды.

4. Буюмдун жана жылуулукта тең салмактуу эмес көп компоненттүү электрдик жаачанын жылуулук физикалык касиеттерине темирдин бууларынын тийгизген таасири сандык изилденди. Темирдин бууларынын катышуусу салыштырмалуу төмөнкү температуралар аймагында электрдик өткөрүмдүүлүгүнүн чоңойушуна, токтун жыштыгынын азайышына, жана ошондой эле ширетүүчү ваннанын радиалдык ченеминин 40% дан ашыгыраак кичирейишине алып келээри аныкталды. Аргондук плазмада темирдин бууларынын болушу толук газдык жылуулук өткөрүүчүлүк чоңдугу темирдин атомдорунун жылуулук өткөрүүчүлүгүнүн жана экинчи иондошуусунун эсебинен чоңоет, анын натыйжасында аноддун катмарында разряддын кысылышы күчөтүлөт.

5. Ширетүүчү ваннанын параметрлерине эритилген темирдин үстүнкү бетиндеги буулануу процессинин таасиринин сандык эсептөөлөрүнүн жыйынтыктары алынды. Темирдин атомдорунун бууланышын эске алуу Лоренцтин электромагниттик күчүнүн өсүүсүнүн эсебинен ширетүүчү ваннага Марангонинин эффектисин азайта тургандыгы, натыйжада ширетүүчү ваннанын радиалдык ченеминин кичирейишине алып келээри, темирдин ээрүү тереңдигинин көбөйүшүнө алып келээрдиги табылды. «Плазма-анод» чегинде коюлган шарттар аноддук потенциалдын түшүшү 6-12В аралыгында экендиги алынды, алар адабияттык жана эксперименталдык берилгендиктерге туура келет.

ДИССЕРТАЦИЯНЫН ТЕМАСЫ БОЮНЧА БАСМАГА ЧЫККАН ИШТЕРДИН ТИЗМЕСИ

1. **Медралиева Б.Н.** Численный анализ гидродинамических процессов сварочной ванны при электродуговой сварке [Текст] / Жайнаков А.Ж. Султангазиева Р.Т. Медралиева Б.Н. // Совместный вып. «Вычислительной технологии» Вестн. КАЗНУ им. аль - Фараби. Серия математика, механика, информатика. -Алмата, 2015. - Т.20.- №3 (86). - С. 208-215.

2. **Медралиева Б.Н.** Численное моделирование процессов электродуговой сварки в замкнутом объеме [Текст] / Султангазиева Р.Т. Медралиева Б.Н. // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им.Н.Исанова, Вестник 2(48) 2015, стр.84-92, г.Бишкек

3. **Медралиева Б.Н.** Сопряженные задачи теплообмена при плазменно-дуговой сварке металлов [Текст] / Кабаева Г.Д. Султангазиева Р.Т. Медралиева Б.Н. // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета, Том 16, №1, 2016, стр.57-62, г.Бишкек

4. **Медралиева Б.Н.** Влияние эффекта Марангони на гидродинамические процессы в сварочной ванне при электродуговой сварке [Текст] / Султангазиева Р.Т. Медралиева Б.Н. // Теоретический и прикладной научно-технический журнал Известия Кыргызского государственного технического университета им.И.Раззакова, №3(36), 2015, стр.225-229, г.Бишкек.

5. **Медралиева Б.Н.** Современные средства компьютерного моделирования задач плазменно-дуговой сварки [Текст] / Жайнаков А.Ж. Султангазиева Р.Т. Медралиева Б.Н. // Теоретический и прикладной научно-технический журнал Известия Кыргызского государственного технического университета им.И.Раззакова, №3(39), часть 1, 2016, стр.92-100, г.Бишкек.

6. **Медралиева Б.Н.** Компьютерное моделирование влияния паров металлов на электродуговую ванну [Текст] / Жайнаков А.Ж. Султангазиева Р.Т. Медралиева Б.Н. // «Математические информационные технологии» MIT-2016 Врнячка Баня, Сербия; Будва, Черногория 05 – 14 сентября 2016г.; стр.312-323.

7. **Медралиева Б.Н.** Математическое моделирование процессов в плазматроне для плазменной утилизации отходов [Текст] / Жайнаков А.Ж. Кабаева Г.Ж. Султангазиева Р.Т. Медралиева Б.Н. // Теоретический и прикладной научно-технический журнал Известия Кыргызского государственного технического университета им.И.Раззакова, №3(47), 2018, стр.477-485, г.Бишкек.

8. **Медралиева Б.Н.** Взаимодействие потоков многокомпонентной электродуговой плазмы с обрабатываемым изделием [Текст] / Жайнаков А.Ж. Султангазиева Р.Т. Медралиева Б.Н. // 47я Международная научная конференция Евразийского Научного Объединения, стр.34-42, Россия. г. Москва, январь 2019.

9. **Медралиева Б.Н.** Моделирование процессов сварочной ванны при электродуговой сварке [Текст] / Жайнаков А.Ж., Султангазиева Р.Т., Медралиева Б.Н. // Евразийское научное общество, Интеграция науки в современном мире, LII Международная научная конференция, Россия. Москва, июнь 2019.

Медралиева Бубусара Нисбековнанын «Плазмалык ширетүүдө жылуулук алмашуусунун тутумдаш маселелерин сандык моделдөө» деген темадагы 01.04.14 – Жылуулук физика жана теоретикалык жылуулук техника адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты окумуштуулук даражасын алуу үчүн жазган диссертациясынын

РЕЗЮМЕСИ

Урунттуу сөздөр: жаа плазмасындагы электр магниттик, жылуулук жана газ динамикасынын кубулуштары, иштетилүүчү металл, сандык моделдештирүү, металл буусу.

Изилдөө объектиси: эритилген жаалык плазмадан, анодук суюк темирдин агымынан жана плазматрондон түзүлгөн плазманын электрдик жаалык агымы.

Иштин максаты: Иштин максаты болуп ширетүү процессине таасирленүүчү параметрлерди изилдөө үчүн эки температуралуу көп компоненттүү аргондук жаанын ширетүүчү ваннанын үстүнкү бети менен өз ара айкалышынын математикалык моделин өнүктүрүүнүн тутумдашмаселесин коюу эсептелет.

Изилдөө ыкмалары: математикалык моделдөө, сандык эксперимент.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы:

1. Эки суюктуктук магниттик газдык динамикалык теңдемелердин негизинде иштетилүүчү буюмдун үстүнкү бетиндеги темирдин атомдорунун буулануусун эске алуу менен ширетүүчү ваннадагы эритилген темирдин агымы менен көп компоненттүү аргондук плазманын агымдарынын өз ара айкалышуусунун математикалык модели өркүндөтүлдү. «Электрдик жаача-ширетүү ванна» өтүү чегиндеги шарттар коюлду жана ушул шарттардын ширетүүчү ваннага жана жылуулук тең салмактуу эмес көп компоненттүү электрдик жаачанын мүнөздөмөлөрүнө таасирлери сандык изилденди.

2. темирдин буулары катышкан аргондук плазманын иондук түзүмү аныкталды, ар бир өз ара айкалышуучу кош бөлүкчөлөр үчүн кагылышуучу интегралдар эсептелип чыкты, жылуулук динамикалык, унаалык, темирдин буулары катышкан жылуулук тең салмактуу эмес аргондук плазманын кинетикалык касиеттери жана зарыл болгон кинетикалык коэффициенттер эсептелип чыкты, темирдин буулары катышкан аргондук плазманын оптикалык касиеттери алынды.

3. Иштетилүүчү буюмдун жана тең салмактуу эмес жаачанын жылуулук физикалык мүнөздөмөлөрүнө плазматрондон турукташтыруучу дубалга чейинки аралыктын жана токтун күчүнүн таасиринин сандык изилденген жыйынтыктары:

а). Токтун күчүн 150 дөн 200 ге чейин чоңойткондо электрдик жаачанын ядросунда энергия алмашуунун коэффициентинин сызыктуу эместиги пайда болот жана аргондун атомдорунун экинчи иондошуусуна туура келген температура аралыгында жаачалык плазмада электрдик жаачанын ядросунда температуранын тепкичтик таркатылышына алып келет.

б). Жаачанын узундугу менен турукташтыруучу дубалга чейинки аралыктын катышы $\frac{R}{L} \leq 2$ электроддун жана дубалдын жакындыгы катодду көздөй кайтаруучу агымдардын пайда болушуна алып келет, ал болсо аноддун аймагында жаачанын контрагирленишине жана катоддун аймагында жаачанын кеңейишине алып келээри аныкталды.

4. Буюмдун жана жылуулукта тең салмактуу эмес көп компоненттүү электрдик жаачанын электромагниттик, газодинамикалык жана жылуулук касиеттерине темирдин бууларынын тийгизген таасири сандык изилденген жыйынтыктары. Темирдин бууларынын катышуусу салыштырмалуу төмөнкү температуралар аймагында электрдик өткөрүмдүүлүгүнүн чоңойушуна, токтун жыштыгынын азайышына, жана ошондой эле ширетүүчү ваннанын радиалдык ченеминин 40% дан ашыгыраак кичирейишине алып келээри жана металлдын эрүүсүнүн тереңдетиши аныкталды.

5. Ширетүүчү ваннанын параметрлерине ээритилген темирдин үстүнкү бетиндеги буулануу процессинин таасиринин сандык эсептөөлөрүнүн жыйынтыктары. Темирдин атомдорунун буулануу менен эске алуу Лоренцтин электромагниттик күчүнүн өсүүсүнүн эсебинен ширетүүчү ваннага Марангониянын эффектисин азайтат, натыйжада ширетүүчү ваннанын радиалдык ченеминин кичирейишине алып келет, темирдин ээрүү тереңдигинин көбөйүшүнө алып келээрдиги табылды. «Плазма-анод» чегинде коюлган шарттар анодук потенциалдын түшүшү 6-12В аралыгында экендигин аныктоого мүмкүндүк берди, алар адабияттык жана эксперименталдык берилгендиктерге туура келет.

Колдонуу аймагы: Алынган жыйынтыктар өндүрүштүк объектилерде электр жаачасынын жардамы менен ширетүүнүн технологиялык процесстерин аткаруу учурунда технологиялык процесстерин жакшыртуу максатында колдонуо болот. Ошондой эле жыйынтыктар окуу процессинде «Математикалык моделдештирүү» сабагын окутууга сунуштоого болот.

Форматы 60x84/16.

Көлөмү 1,5 б.т. Офсеттик кагаз. Нускасы 100 экз.

«Мега Формат» басмасында басылды.

