

**И. РАЗЗАКОВ атындагы КЫРГЫЗ МАМЛЕКЕТТИК
ТЕХНИКАЛЫК УНИВЕРСИТЕТИ**

**Н. ИСАНОВ атындагы КЫРГЫЗ МАМЛЕКЕТТИК КУРУЛУШ,
ТРАНСПОРТ ЖАНА АРХИТЕКТУРА УНИВЕРСИТЕТИ**

Д.01.15.50 Диссертациялык кеңеши

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

АМАНКУЛОВА НУРГУЛ АСИМКАНОВНА

**ПЛАЗМАНЫН ЭЛЕКТР ЖАА АГЫМЫНЫН ИШТЕТИЛҮҮЧҮ
БЕТ МЕНЕН ӨЗ АРА АРАКЕТТЕШҮҮСҮ**

01.02.05 – Суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы

Физика - математика илимдеринин кандидаты
окумуштуулук даражасын алуу үчүн жазылган диссертациянын
авторефераты

Бишкек – 2016

Диссертация И. Раззаков атындагы КМТУга караштуу академик У. Асаналиев атындагы Тоо-кен иштери жана тоо-кен технологиялары институтунда аткарылды.

Илимий жетекчиси: физика - математика илимдеринин доктору, Кабаева Гульнара Джамалбековна

Расмий оппоненттер: физика - математика илимдеринин доктору, профессор Чечейбаев Байыш

физика - математика илимдеринин кандидаты, профессор Табышов Рыскелди

Жетектөөчү мекеме: аль - Фараби атындагы Казак улуттук университетинин Математика жана механика илим - изилдөө институту, дареги: Казакстан, 050040, Алмата ш., аль - Фараби пр., 71.


Диссертациялык иш 2017- жылдын 3 - февралында саат 14.00дө И. Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетине жана Н. Исанов атындагы Кыргыз мамлекеттик курулуш, транспорт жана архитектура университетине караштуу Д.01.15.505 Диссертациялык кеңештин жыйынында корголот. Дареги:720044, Бишкек ш., Ч.Айтматов пр., 66, 1 / 314 - ауд.

Диссертация менен И. Раззаков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университетинин китепканасынан (720044, Кыргыз Республикасы, Бишкек ш., Ч. Айтматов пр., 66) жана Н. Исанов атындагы Кыргыз мамлекеттик курулуш, транспорт жана архитектура университетинин китепканасынан (720020, Кыргыз Республикасы, Бишкек ш., А.Малдыбаев көч., 34б) таанышууга болот.

Диссертациянын авторефераты И. Раззаков атындагы КМТУнун <http://kstu.kg> сайтында жайгаштырылды.

Автореферат 2016- жылдын “ ____ ” _____ таратылды.

Д 01.15.505 Диссертациялык кеңешинин окумуштуу катчысы
ф - м.и.к.



Мекенбаев Б.Т.

ИШТИН ЖАЛПЫ МҮНӨЗДӨМӨСҮ

Диссертациянын темасынын актуалдуулугу. Азыркы учурда материалдарды плазма технологиялары менен кайра иштетүү кеңири колдонулууда аларга: плазмалык кесүү, ширетүү, эритүү, жана башка түрлөрү кирет. Плазманын жаа агымы плазматрондордо пайда болот, плазма пайда кылуучу чөйрө катары ар кандай газдар жана газ аралашмалары колдонулат, ал эми электр өткөрүмдүү материалдар иштетилип жаткан нерсе экинчи электрод – анод катары каралат.

Электр жаа плазмасындагы электр магниттик, жылуулук жана газдын динамикалык кубулуштарын изилдеп үйрөнүүгө теориялык жана эксперименттик көптөгөн изилдөөлөр арналган, алардын негизгилери катары В. Финкельбург, Г. Меккер, М.Ф. Жуков, С.В. Дресвин, В.С. Урюков, В.С. Энгельшт, Г.А. Десятков, Ж.Ж. Жеенбаев, А.Ж. Жайнаков, В.М. Лелевкин, В.С. Слободянюк ж.б. окумуштуулардын эмгектери болуп саналат.

Ар кандай тармактарда электр жаасын колдонууну кеңейтүү маселелери жаа процесстерин да, иштетилүүчү нерсе менен электр жаа плазмасынын өз ара аракеттешүү процесстерин да комплекстүү изилдеп үйрөнүүгө алып келди. Аны менен бирге, плазманын жаа агымынын металл менен болгон өз ара аракеттешүүсүндөгү, металлдын кайноо температурасына чейин интенсивдүү ысытуу жана металл буусунун пайда болушу орун алган зонасындагы жылуулук масса алмашуу процесстерине таасирин тийгизүүсү мүмүн болгон жана металлдагы термодетформациялык жана структуралык өзгөрүүлөргө алып келүүчү көп фазалуу процесстерди изилдөөгө алып келет. Мындан тышкары, нерселерди иштетүү үчүн плазманын электр жаа агымынын технологиялык мүнөздөмөлөрүн жогорулатуу милдети, плазма пайда кылуучу иш чөйрөлөрүнүн бир кыйла эффективдүү аралашмаларын табууга, алардын курамын жана касиетин изилдөө зарылдыгына алып келет. Жогоруда көрсөтүлгөндөрдүн баары изилдөө темасынын актуалдуулугун аныктайт.

Диссертациянын темасынын негизги илимий изилдөө иштери менен байланышы.

Диссертациялык иш академик У. Асаналиев атындагы Тоо-кен иштери жана тоо-кен технологиялары институтунун академик А.Жайнаков атындагы Маалымат технологиялары жана математикалык моделдештирүү кафедрасынын илимий иштеринин планына жана Кыргыз Республикасынын Билим берүү жана илим министрлигинин (2009-2016-жж.) долбоорлору боюнча аткарылды.

Изилдөөнүн максаты жана милдеттери. Иштин максаты электр жаа плазмасындагы жана металлдын эрүүсүн жана буулануусун эске алуу менен, металлдын иштетилүүчү бетиндеги процесстерди бирге карап чыгуу үчүн плазманын жергиликтүү термодинамикалык тең салмактуулугунун (ЖТТ) жакындашуусунда электр жаасынын эки өлчөмдүү стационардык математикалык моделин өнүктүрүү болуп саналат.

Коюлган максаттар төмөнкү маселелерди чечүү жолу менен ишке ашырылды:

- Электр жаа плазмасынын металлдын иштетилүүчү бети менен өз ара аракеттешүүсү, муну менен катар орун алган көп фазалуу процесстерди эске алуу менен жана алардын математикалык моделдештирилиши маселелеринин изилденишин анализдөө;

- Сандык моделдештирүүнүн негизинде газ аралашмасынын курамынын электр жаасынын мүнөздөмөсүнө жана металлдын иштетилүүчү бетинде болуп өткөн жылуулук процесстерине тийгизген таасирине салыштырмалуу анализ жүргүзүү.

Пайдаланылып жаткан газ аралашмасынын компоненттеринин катышынын өзгөрүшү менен жаа плазмасынын термодинамикалык мүнөздөмөлөрүн эсептөө;

- Эки өлчөмдүү стационардык математикалык моделди жаанын металлдын иштетилүүчү бети менен өз ара аракеттешүүсүндө металлдын иштетилүүчү бетиндеги өтмө шарттарды, фазалык абалды эске алуу менен, жаа – иштетилүүчү зонасы эсептөө схемасы үчүн МГД теңдемелеринин бирдиктүү системасынын негизинде жергиликтүү термодинамикалык тең салмактуулук (ЖТТ) позициясында иштеп чыгуу;

- Электр жаасынын металлдын иштетилүүчү бети менен өз ара аракеттешүүсүндө, металл буусунун электр жаа плазмасынын жана эритилген металлдын касиеттерине тийгизген таасирин эске алуу менен, электр магниттик жана жылуулук кубулуштарына сандык изилдөөлөрдү жүргүзүү;

- Металлдын касиеттерине жана иштетүүнүн жылуулук режимдерине жараша металлдын иштетилүүчү бетиндеги жылуулук мерчемине жана температуралык талааларга сандык анализ жүргүзүү.

Алынган натыйжалардын илимий жаңылыктары төмөнкүлөр болуп саналат:

- Жаа плазмасынын мүнөздөмөсүнө иште пайдаланылган аралашманын курамындагы компоненттердин тийгизген таасирине сандык салыштырмалуу анализ жүргүзүлдү. Аргондун активдүү газдардын компоненттеринен турган аралашмасын колдонуу, таза аргонду пайдаланганга салыштырганда жаанын огунун тегерегиндеги температураны дээрлик 4000Кге чейин, абаны пайдаланганга салыштырганда 2000Кге жогорулашына алып келери аныкталды.

- Аба чөйрөсүндө жаа – иштетүү зонасы эсептөө схемасы үчүн МГД теңдемелердин бирдиктүү системасынын негизинде металлдын иштетилүүчү бетинде жаа менен металлдын өз ара аракеттешүүсүнүн өтүү шарттарын эске алуу менен, эки өлчөмдүү стационардык математикалык моделдин математикалык модели ЖТТ позициясынан өнүктүрүлдү.

- Электр жаасындагы жана ширетүү ваннасынын көлөмүндөгү процесстерди, иштетилип жаткан нерсенин бетинен металлдын атомдорунун буулануу кубулуштарын эске алуу менен кароо үчүн эки өлчөмдүү стационардык математикалык модель ЖТТ позициясында өнүктүрүлдү. МГД теңдемелер системасы металл буусунун конвекциялык диффузиясынын теңдемеси менен толукталды. Бардык эсептөө аймагы боюнча металл буусунун концентрациясы үчүн чектик шарттар коюлду.

- Металл буусу жана металл буусунун диффузиясынын коэффициенттери электр жаасынын көлөмүндө эсептелип чыгарылды. Конвекция октун өзөгүндө басымдуулук кылаары, ошондуктан металл буулары радиалдык багытта газ агымыдары менен таралуусу жана аноддун бети боюнча агуусу аныкталды. Металлдын буусунун болушу жаанын муздашына алып келери аныкталып, бул 5000Кден 13000Кге чейинки температуралардын аралыгында нурлануу коэффициентинин көбөйүшү менен бул аралыктагы радиациялык жоготуулардын өсүүсү менен шартталгандыгы аныкталды.

- Электр жаасынын мамычасындагы жана эриген зонада токтун тыгыздык линиясы аныкталды. Металл буусунун болушу менен электр өткөрүмдүүлүктүн өзгөрүшү жаанын муздашына жана жаанын эритүү жөндөмдүүлүгүнүн электр магниттик түзүмдүн азайышына алып келери аныкталды. Металл буусун эске алуу менен маселени чечүүдө жаадан чыккан жылуулук агымынын анодго карай 27%га төмөндөшү, аноддун бетинде температуранын 7 %га төмөндөшүнө алып келери көрсөтүлдү.

Алынган натыйжалардын практикалык мааниси

Алынган натыйжалар материалдарды иштетүүдөгү технологиялык процесстерде, плазматрондордун иштөө режимин оптималдаштыруу максатында энергиянын электр жаа агымы менен ар түрдүү нерселердин беттерин иштетүү процесстерин изилдөөдө пайдаланылышы мүмкүн. Изилдөөнүн жыйынтыктарын окуу процессинде «Математикалык моделдештирүү», «Металлургиялык процесстерди математикалык моделдештирүү» сабактарында колдонууга сунуштаса болот.

Диссертациянын коргоого сунушталган негизги жоболору:

– Аргондун активдүү газдардын компоненттеринен турган аралашмасын колдонуу, таза аргонду пайдаланганга салыштырганда жаанын огунун тегерегиндеги температураны дээрлик 4000Кге чейин, абаны пайдаланганга салыштырганда 2000Кге жогорулашына алып келерин көрсөтүүчү, жаа плазмасынын мүнөздөмөлөрүнө иш чөйрөсүнүн компоненттик курамынын таасиринин салыштырмалуу сандык анализинин натыйжалары.

– Иштетилүүчү бетке аба жана аргон чөйрөсүндө жаа плазмасынын электр магниттик жана жылуулук таасирлеринин мүнөзүн аныктоого мүмкүндүк бере турган бирдиктүү моделдин негизинде сандык эсептөөлөрдүн натыйжалары. Аргондогу жаага салыштырганда, абадагы жаа бир кыйла кысылган жана жаанын туурасынан кеткен өлчөмү кичирээк болоору аныкталды. Аргонго караганда абаны иш чөйрөсү катары колдонууда жаанын эритүү жөндөмдүүлүгү 1.3 эсе жогорулай тургандыгы аныкталды.

– Жаанын иштетилүүчү металл менен өз ара аракеттешүүсүндө болгон шартты эске алуу менен бирдиктүү МГД теңдемелер системасынын негизинде жаа - иштелүүчү зонасы эсептөө схемасы боюнча иштетилүүчү нерсенин металл буусун эске алуудагы фазалык абалды эске алуу менен конвективдүү диффузия теңдемеси менен толукталды.

– Металл буусунун электр жаасынын жана иштетилүүчү беттин жылуулук, электромагниттик жана динамикалык мүнөздөмөлөрүнө тийгизкен таасиринин сандык изилдөөлөрүнүн жыйынтыктары. Конвекция октун өзөгүндө басымдуулук кылаары, ошондуктан металл буулары радиалдык багытта газ агымыдары менен таралуусу жана анодтун бети боюнча агуусу аныкталды. Металл буусунун болушу жаанын муздашына алып келет, бул металл буусунун 5000Кден 13000Кге чейинки температуралардын аралыгында нурлануу коэффициентиинин жогорулашы менен байланыштуу.

– Буунун болушу менен электр өткөрүмдүүлүгүнүн өзгөрүшү металлдын фазалык өтүү учурунда жаанын эритүү мүмкүнчүлүгүнө салым кошуучу электр магниттик түзүмдүн азайышына алып келери аныкталды. Металл буусун эске алуу менен маселени чечүүдө жаадан чыккан жылуулук агымынын анодго карай 27 %га төмөндөшү, аноддун бетинде температуранын 7%га төмөндөшүнө алып келери көрсөтүлдү.

Изилдөөчүнүн жеке салымы. Диссертациядагы алынган натыйжалар автордун өз алдынча изилдөөлөрүнүн жыйынтыктары. Иштин максатына жетүү үчүн жеке салымы катары илимий изилдөө ыкмаларын жана жолдорун тандап алуу менен илимий макалаларды жазуу жана чыгаруу, жыйынтыктарын иштеп чыгуу жана аларды талдоо, илимий жыйынтыктарды алуу, изилдөө жүргүзүү болуп эсептелет.

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

Изилдөө жыйынтыктарын сыноо. Иштин жыйынтыктары эл аралык жыйындарда билдирүү жасалып жана талкууга алынган:

– «Илим, технология, билим берүү, маалыматтык технологиялар жана математикалык моделдөө», Бишкек, 2011-ж.;

– «Математикалык маалымат технологиялары» МПТ-2013 Врнячка Баня, Сербия; Будва, Черногория, 2013-ж., 5–14-сентябрь;

– «Илимдин, техниканын жана билим берүүнүн эсептөө жана маалыматтык технологиялары» (ciTech-2015) Алмата, Казакстан;

– «Илимдеги инновациялар» LI эл аралык илимий - практикалык жыйын. Новосибирск, № 11 (48) 2015-ж., ноябрь, I - бөлүм.

Илимий иштин жыйынтыктарынын басылмаларда толук чагылдырылышы. Изилдөөнүн жыйынтыктары КР ЖАК тарабынан сунушталган илимий басылмаларда жана ошондой эле эл аралык жыйындардын эмгектеринде 18 макалада жарыяланган.

Илимий иштин түзүлүшү жана көлөмү. Илимий иш киришүүдөн, 4 бөлүмдөн жана корутундудан, 138 аталыштагы адабияттардын тизмесинен, 52 сүрөттөн, 6 таблицаны кошуу менен 125 барактан турган машинкага терилген текстте көргөзүлгөн.

ИШТИН НЕГИЗГИ МАЗМУНУ

Киришүүдө изилдөөнүн актуалдуулугу, иштин максаты жана милдеттери, илимий жаңылыгы, жыйынтыктарынын теориялык жана практикалык мааниси көрсөтүлгөн. Изилдөөнүн коргоого коюлган негизги жоболору берилген.

Биринчи бөлүмдө илимий темага байланыштуу эмгектер жөнүндө кеңири маалымат берилген. Жаа плазмасындагы жана металлдын иштетилүүчү бетиндеги процесстерде металлдын эрүүсүн жана буулануусун эске алуу менен плазманын эки өлчөмдүү стационардык математикалык моделин жергиликтүү термодинамикалык тең салмактуу (ЖТТ) абалында бирдиктүү карап чыгууну андан ары өнүктүрүү зарылчылыгы көрсөтүлөт. Электр жаа агымдарынын жана иштетилүүчү нерсенин эриген металл агымдарынын өз ара аракеттешүүсүнүн, электр жаасындагы, нерсенин бетиндеги жана ичиндеги өз ара байланышкан процесстерди бир эле сүрөттөлүш катары кароого мүмкүндүк берүүчү математикалык модель сунуш кылынып, өз кезегинде, бул процесстердин динамикасын жана өз ара аракеттешүүсү жөнүндө толук маалымат алууга мүмкүндүк берет. Бул милдетти чечүүнүн өзгөчөлүгү ар бир аймактагы процесстерди бир эле магниттик гидродинамикалык теңдемелер (МГД теңдемелери) системасы аркылуу баяндап берүү болуп эсептелет.

Модель системасында төмөнкүдөй божомолдор каралган: электр жаасы менен иштетилүүчү бет октук симметриялуулукка ээ, плазма жаасы жергиликтүү термодинамикалык тең салмактуу (ЖТТ) абалында, сырткы магнит талаасы жана газ айланпалары жок, газ жана эриген металл кысылбаган абалда, агымдар ламинардык, иштетилүүчү нерсенин бети жалпак. Иштетилүүчү беттин ичинде төрт түрдүү кыймыл күчтөрү каралган тыгыздыктарынын айырмасынан улам пайда болгон Архимед күчү, электр жаа плазмасынын жана эриген металлдын агымдарынын ортосундагы илешекетүүлүк өз ара аракеттенишүү күчү, магнит талаасынан жана электр тогунан улам пайда болгон электр магниттик күч жана эриген металл агымынын кыймылынын ылдамдыгына жана багытына, ваннанын формасына таасир берүү, Марангони эффекти. Бул тапшырманын алкагында радиусу R жана эрүү тереңдиги h болгон ширетүү ваннасынын көлөмүндө, анын формасы эрүү

изотермасы T_{plav} менен аныкталып, эриген металлдын абалы МГД теңдемелери менен түшүндүрүлөт деп болжолдойбуз. Башкача айтканда, электр жаа разрядынын мамычасындагы жана ушул разряд менен аракеттенишкен эриген металлдагы физикалык процесстерди түшүндүрүүдө ошол эле магниттик гидродинамикалык теңдемелер системасы колдонулат. Бул теңдемелер системасы үзгүлтүксүздүктүн, Навье - Стокстун, энергиянын, Максвеллдин теңдемесин жана Омдун законун камтыйт:

Үзгүлтүксүздүк теңдемеси:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

Радиалдык түзүм үчүн кыймылдын теңдемеси:

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

Аксиалдык түзүм үчүн кыймылдын теңдемеси:

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

Энергиянын сакталуу мыйзамы:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho v h - \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho u h - \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{1}{\sigma} (j_r^2 + j_z^2) - q + S_h \quad (4)$$

Максвеллдин теңдемелери:

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0; \quad \frac{1}{r} \frac{\partial r H_\varphi}{\partial r} = j_z; \quad -\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} = j_r \quad (5)$$

Омдун закону:

$$j_r = \sigma E_z, \quad j_z = \sigma E_r \quad (6)$$

(1-6) системасы: $\sigma = \sigma(T, P)$, $\lambda = \lambda(T, P)$, $\mu = \mu(T, P)$, $\rho = \rho(T, P)$, $q = q(T, P)$, $c_p = c_p(T, P)$,

$$h = h(T, P) \quad (7)$$

катыштары менен толукталат.

(1– 6) теңдемелерди жазууда төмөндөгүдөй белгилөөлөр колдонулат: u , v – агымдын аксиалдык жана радиалдык ылдамдыктары; P – басым; T – температура; j – токтун жыштыгы; E – электр талаасынын чыңалуусу; H – магнит талаасынын чыңалуусу; B – магниттик индукция; ρ – плазманын тыгыздыгы; c_p – туруктуу басым учурундагы жылуулук сыйымдуулук; μ – илээшкектик, λ – жылуулук өткөрүмдүүлүк коэффициенти, q – нурлануу жөндөмдүүлүгү, σ – электр өткөрүмдүүлүк, h – энтальпия.

Кыймыл теңдемесинде:

$$S_u = \begin{cases} 0 & \text{жаа учурунда} \\ \rho g - \rho g \beta (T - T_0) & \text{ширетүүчү ванна учурунда} \end{cases} \quad (8)$$

бул жерде β – жылуулуктан кеңейүүнүн коэффициенти; g – эркин түшүүнүн ылдамдануусу; Берилген кошулуучу Буссинесканын жакындатуусундагы ширетилген металлдагы сүрүп чыгуучу күчтүн жана инерция күчүнүн суммасы менен шартталат.

Энергиянын теңдемесинде S_h булактык кошулуучу, эритүүгө кеткен жылуулуктун жоголушун эске алат. Ал фаза өзгөрүү учурундагы эритүүгө кеткен

салыштырмалуу жылуулуктун жүрүшүн көрсөтөт: эрүү учурунда жылуулук жутулат, башкача айтканда, катуу фазадан суюк фазага өткөндө жана суюктук каткан учурда жылуулук бөлүнүп чыгат.

H_f – салыштырмалуу энтальпиясы.

$$H_f = \begin{cases} L & T > T_l \\ f_l L & T_s \leq T \leq T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases}, \quad (9)$$

бул жерде L – анод металлынын салыштырмалуу эрүү жылуулугу.

Эриген металлда суюк фракция f_L температурага салыштырмалуу түз сызык боюнча өзгөрөт (s – катуу фракция).

$$f_L = \begin{cases} 1 & T > T_l \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s < T < T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases}. \quad (10)$$

Ширетүүчү ваннасы үчүн энергиянын теңдемесинде эффективдүү жылуулук сыйымдуулугу колдонулат: $c_p^{ef} = c_p + \Delta H_f \frac{\partial f_l}{\partial T}$ (11)

Бул жерде ΔH_f – анод материалынын эрүүсүнүн салыштырмалуу жылуулугу.

МГД – теңдемелер системасы “токтун куюн – функциясы” өзгөрмөлөрүндө ω - куюндун чыңалуусу, ψ - токтун функциясы, χ - электр тогунун функциясы өзгөрүлмөлөрүн киргизүү жолу менен чыгарылат. Ал өзгөрүлмөлөр цилиндрдик координата системасында октук симметрия учурунда төмөндөгүдөй катыштары менен аныкталат:

$$\omega = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right); \quad \frac{\partial \psi}{\partial r} = \rho u r, \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} = \rho v r; \quad \frac{\partial \chi}{\partial r} = r j_z, \quad -\frac{\partial \chi}{\partial z} = r j_r \quad (12)$$

Анда баштапкы система төмөнкү канондук түрүндө жазылат:

$$a \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\varphi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\varphi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[b \frac{\partial (c\varphi)}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[b \frac{\partial (c\varphi)}{\partial r} \right] + e r = 0, \quad (13)$$

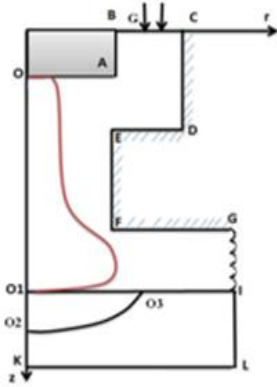
бул жерде $\varphi, \omega, \psi, h, \chi$ маанилерине ээ изделүүчү функция, a, b, c, e ар бир теңдемеге туура келген сызыктуу эмес коэффициенттер. Коэффициенттердин маанилери 1 - таблицада көрсөтүлдү.

1- таблица - Канондук теңдемедеги коэффициенттердин мааниси

φ	a	b	c	e
ω	r^2	r^3	μ	$-r^2 \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u^2 + v^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{\mu}{r^3} \frac{\partial \chi}{\partial z} - g \frac{\partial \rho}{\partial r} + S_w \right]$
ψ	0	$\frac{1}{\rho r}$	1	ωr
h	1	$\frac{\lambda}{c_p} r$	1	$\frac{1}{\sigma r} \left[\left(\frac{\partial \chi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \chi}{\partial z} \right)^2 \right] - \Psi r + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\rho D - \frac{\lambda}{c_p} \right) (h_m - h_p) \frac{\partial C_1}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\rho D - \frac{\lambda}{c_p} \right) (h_m - h_p) \frac{\partial C_1}{\partial r} \right]$
χ	0	$\frac{1}{\sigma r}$	1	0

Бирдиктүү (13) формада жазылышы теңдемелерди чыгарууда бир эле алгоритмди колдонууга мүмкүн берет.

Чектик шарттарды коюу. 1- сүрөттө эсептөө аймагынын схемасы



1-сүрөт. Эсептөө схемасынын аймагы

көрсөтүлгөн. Катод – жалпак учу менен цилиндр, плазматрондун каналы – ички радиусу R_k жана сырткы радиусу R болгон көңдөй цилиндр, анод–иштетилүүчү нерсе. Эсептөө аймагы бир жагынан катоддун капталы жана учунун бети менен, OZ огу, экинчи жагынан $r = R_k$ кесилиш бөлүгүнөн, өйдө жагынан $O\Gamma$ огу менен, төмөн жагынан материалдын астынкы бөлүгү менен чектелет. Катоддун капталы жана каналдын ички капталынын ортосу аркылуу аксиалдык багытта газ агымдары берилет.

(BC) кирүү кесилишинде чек ара шарттары $z = 0$ кесилишиндеги ылдамдыктын таралуусу менен аныкталат:

$$u(r, 0) = \frac{2G \left(\frac{R_c^2 - R_k^2}{\ln \frac{R_c}{R_k}} \ln \frac{R_c}{r} - R_c^2 + r^2 \right)}{\pi \rho (R_c^2 - R_k^2) \left(\frac{R_c^2 - R_k^2}{\ln \frac{R_c}{R_k}} - R_c^2 - R_k^2 \right)} \frac{dP}{dz} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \mu \frac{du}{dr} \right). \quad (14)$$

Катоддун учунда температуранын таралышы эксперименталдык маалыматтарды эске алуу менен же Урюковдун таралуусу менен берилет:

$$T_k(r) = (T_{\text{кип}} - T_0) \left(1 - \frac{r}{R_k} \right)^m \left(1 + \frac{r}{R_k} m \right) + T_0, \quad (15)$$

бул жерде $T_{\text{кип}}$ – катод материалынын кайноо температурасы, m – температура профилинин толуу даражасы.

2-таблица - ω, ψ, χ, h өзгөрүлмөлөрү үчүн чектик шарттар

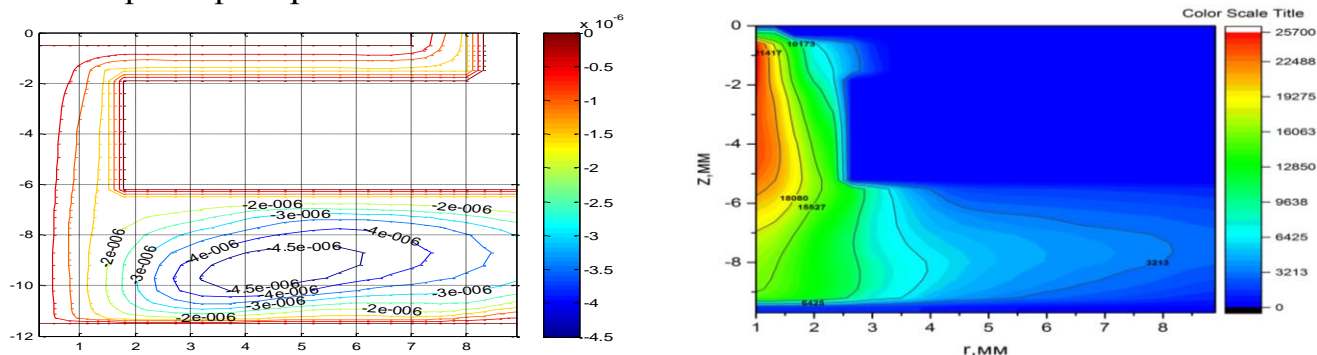
	ω	ψ	h, T	χ
BC	$\omega = -\frac{1}{r} \frac{\partial u(r, 0)}{\partial r}$	$\psi = \rho \int_{R_k}^r u(r, 0) r dr$	$h = h_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
BA	–	$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0; \psi = 0$	$h = h_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
CD EF	–	$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0; \psi = \frac{G}{2\pi}$	$h = h_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
OA	–	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0; \psi = 0$	$h = h_k$	$\chi_k = \frac{I \int_0^r \sigma r dr}{2\pi \int_0^{R_k} \sigma r dr}$
ED FG	–	$\frac{\partial \psi}{\partial z} = 0; \psi = \frac{G}{2\pi}$	$h = h_0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
GI	$\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \psi}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial h}{\partial r} = 0$	$\chi = \frac{I}{2\pi}$
OK	$\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0$	$\psi = 0$	$\frac{\partial h}{\partial r} = 0$	$\chi = 0$
O1O3	$\mu_p \omega_p = \mu_a \omega_a$ $-\frac{1}{r} \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$	$\psi = 0$	$\lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial z} = \lambda_{\text{дуги}} \frac{\partial T_{\text{дуги}}}{\partial z}$ $-\sigma_\epsilon \epsilon (T_a^4 - T_0^4)$ $-W_v h_{fg} - j \phi_a$	$\frac{\partial \chi}{\partial z} = 0$

Чектик шарттар куюндун чыңалуусу үчүн катуу чектен бир кадам аралыкта болгон чекиттерде берилген, ал болсо ар кандай формадагы чек үчүн тик бурчтуу тордогу чечимдин тууралыгынын туруктуулугун камсыздоого жана бурчтук чекиттердеги чектик шарттардын берилишинин бирдей эместик маанилеринен

сактанууну камсыздайт. (13) жалпыланган дифференциалдык теңдемесинин дискретизациясы чектүү айырмалар ыкмасы менен аткарылды (Самарский А.А., Патанкар С.). (13) теңдемесинин дискреттик аналогдору алынган сызыктуу теңдемелеринин системасы Зейдел - Гауссун итерациялык ыкмасынын ылдыйкы релаксациясын колдонуу менен чыгарылды.

Экинчи бөлүмдө иштетүүдө колдонулуучу плазма пайда кылуучу жана иште пайдаланылган аралашмаларынын кыйла эффективдүүлөрүн табуу максатында, коргоочу жана плазма пайда кылуучу газдардын касиеттерин жана курамын эсептөөнүн ыкмалары жана түшүндүрмөлөрү каралган. Электр жаасынын жылуулук мүнөздөмөлөрүнө газдардын аралашмасынын таасирин изилдөө үчүн температуранын 300-35000K аралыгында ар кандай түзүмдүк катнаштагы активдүү газдар менен аргондун аралашмасы үчүн эсептер жана абанын ташуучу коэффициенттери, термодинамикалык функциялары, тең салмактуу курамдарынын текшерүүчү эсептер чыгарылды. Эсептөөлөрдү жүргүзүүдө апробациядан өткөн АСТРА 4, ТЕРРА программалары жана белгилүү ыкмалар колдонулду. Алынган жылуулук физикалык коэффициенттер иш чөйрөсүнүн газдык курамына карата жаа разряддарындагы жылуулук процесстердин сандык салыштырма талдоосун жүргүзүү үчүн колдонулду.

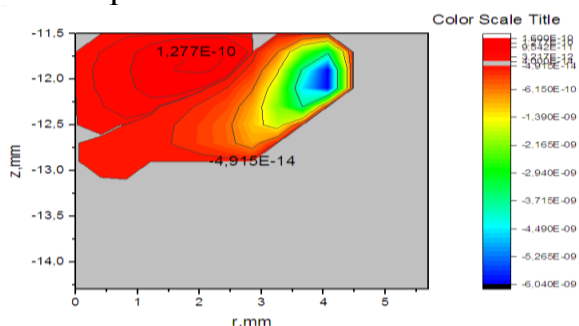
Сандык эсептөөлөр $I=150A$, $I=200A$ жана $I=250A$ токторунда жүргүзүлдү, жаа $P=0.1$ МПа басымында, 5мм туруктуу электрод аралыгында ачык аба чөйрөсүндө күйөт, анод материалы катарында алюминий колдонулат. Катоддогу жаанын өлчөмү цилиндрлик электроддун өлчөмүнө барабар жана 1 мм ны түзөт, катод тагынын ортосундагы температура 18000K. Катоддун капталдары жана турукташтыруучу капталдар $T=300K$ сактап турат. Аноддо жаанын өлчөмү коюлган шарттарга жараша эсептөө процессинде калыптанат. 2-3-сүрөттөрдө $I=150A$, $G=10$ мг/сек. учурунда аба электр жаасынын мамычасындагы изотерма жана газдын бирдей сарпталыш сызыктары көрсөтүлгөн:



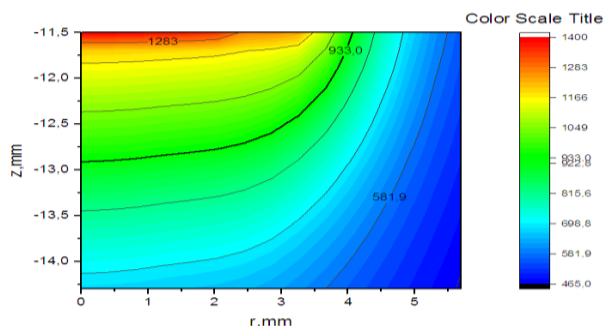
2-сүрөт. Газдын бирдей сарпталыш сызыктары. 3-сүрөт. Температуралардын изолиниялары.

Сандык эксперименттер бош аймакта борборго турукташкан тороидалдык куюндун пайда болорун, куюндун чоңдугу жана формасы плазматрондун чоңдугунан жана геометриясынан, газдын сарпталышынан көз каранды экендигин көрсөттү. Ваннын көлөмүндө эриген металл сааттын жебеси менен бир багытта кыймылдайт. Суюктуктун агымдарын шарттаган негизги күчтөр болуп, Марангонинин беттик тартылуу күчү жана плазма агымдарынын илешкектик аракеттешүү күчү эсептелет. Беттик тартылышуунун градиенти терс мааниге ээ болуп, ал эми эриген металлдын ваннысынын бетиндеги конвективдүү агым борбордон четке карай агат. Илээшкектик өз ара аракеттенүүчү күчү эриген

металлдын агымын дагы борбордон чет жака карай багытта тартат. $I=150A$ учурунда электр магниттик күчтөрдүн аракети бул каралган токтун күчүндө эриген металлдын көрүнүшүнө көрүнүктүү таасир бере албайт. 4-5-сүрөттөрдө $I=200A$ учурундагы изотермдердин жайгашуусу жана иштетилүүчү нерсенин үстүнкү бетиндеги эриген металл агымдарынын мүнөзү көрсөтүлгөн. Токтун күчүн $200A$ чейин көбөйтүүдө эриген металлдын ваннасынын борбордук бөлүгүндө куюн пайда болот, анын кыймылы электр магниттик күчтүн ролунун күчөшү менен шартталып, суюк металлдын агымын ваннанын ичин карай айдап, ваннанын борборуна карай ваннанын бетинде конвективдүү агым түзүлөт. Ваннанын чет жактарында эриген металлдын агымынын чет жакка карай кыймылы сакталат, бул электр жаасынын агымынын жана термокапиллярдык конвекциянын илээшкектик аракеттенүүсү менен шартталат.



4-сүрөт. Токтун функциясынын изолиниялары.



5-сүрөт. Температуранын изолиниялары.

Токтун күчүн $250A$ чейин көбөйтүүдө беттик тартылуу күчүнүн аракети Лоренц күчүнө салыштырганда жогорулап, эриген металлдын көлөмүндө кайрадан бетте ваннанын бетинин борборунан чет жакка карай багытталган, эриген аймактын радиалдык өлчөмүн чоңойтуучу, эриген жердин тереңдигине дээрлик өзгөртүүгө алып келбеген бир эле куюн пайда болот. Токтун күчүн мындан ары дагы $300A$ чейин көбөйтүүдө иштетилүүчү беттин эрүүсүнүн тереңдигине дээрлик таасир бербейт, жөн гана анын туурасы илээшкектик сүрүлүү күчүнүн жана Марангони күчүнүн басымдуулугунан чоңоёт.

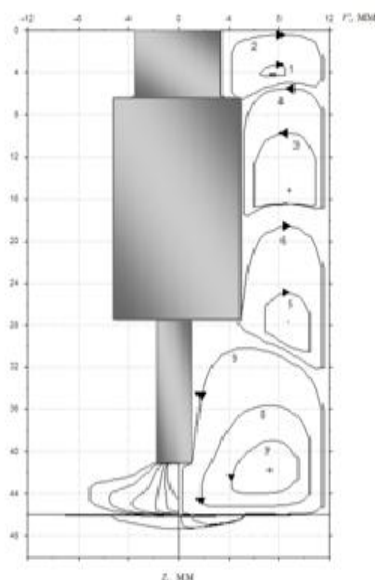
Аба учурунда эриген металлдын бетинен радиалдык аккан плазма агымы термокапиллярдык конвекциянын жана илээшкектик аракеттенүүсүнүн негизинде эриген металлдын жогорку катмарын радиалдык кыймылга алып келип, ширетүү ваннасынын жалпы көлөмүндө куюнду пайда кылат, анын борбору эриген металл агымынын кыймылынын багыты боюнча жылат. Жалпак алюминий үчүн аргон учурунда ширетилүүчү ваннанын анын чет жактарында терс багытка ээ, өзүнүн кыймылы менен негизги куюнда канча металл болсо, ошончо металлды алып кетүүчү кошумча куюн пайда болот. Аба жана аргон үчүн жумушчу газдардын чыгымдары $G = 10 \text{ мг/сек}$ болгондогу ар кандай токтун күчүндө эриген металлдын ваннасынын параметрлери 3 – таблицада көрсөтүлгөн.

3- таблица - Эриген металлдын параметрлеринин жумушчу газдарга көз карандылыгы.

	Аба		Аргон	
	Rv (мм)	Hv (мм)	Rv(мм)	Hv (мм)
I=150A	3,4	1,2	2	0.7
I=200A	3,5	1,4	2.3	0.9
I=250A	3.9	1,45	2.8	1.0

Аргондогу жаанын эсептеп чыккандагы жыйынтыктары менен салыштырганда, абадагы жаа көбүрөөк кысылган, жаанын туурасынан кесилиш өлчөмдөрү кичирээк болот жана алар иштетүүчү нерсеге чоңураак жылуулук жана күч таасирлерин шарттайт.

Үчүнчү бөлүмдө металлдагы жана жаанын аноддун аймагындагы электрдик жаа плазмасынын касиетине металлдын буусунун таасирин эске алуу менен иштетилүүчү беттин электр жаасы менен аракеттенүүсүнүн математикалык модели келтирилет. Система жабык көлөмдө, ал көлөм 6 - сүрөттө келтирилет. Анык



6-сүрөт. Эсептөө схемасынын аймагы

плазматрондун эрибей турган катоду жалпак учтуу болгон цилиндрге окшош, аноддун кызматын иштетилүүчү нерсе аткарат, аймак R аралыгындагы каптал жактык дубалдар менен чектелген. Электр жаа разрядынын мамычасындагы физикалык процесстер жана аны менен аракеттенүүчү суюк металлдагы физикалык процесстер бирдиктүү магниттик гидродинамикалык теңдемелер системасы (1–6) менен сүрөттөлөт. Система металлдын буусунун конвективдүү диффузия теңдемеси менен толукталат:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v C_1) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u C_1) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho D \frac{\partial C_1}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D \frac{\partial C_1}{\partial z} \right) \quad (16)$$

$$\text{Бул учурда кошулуучу } S_h = -\nabla \left[(h_m - h) \frac{\lambda}{C_p} \nabla C_1 \right]$$

энергиянын сакталуу мыйзамындагы плазма түзүүчү газдын жана металлдын буусунун аралашуусунан келип чыккан энтальпиянын өзгөрүүсүн аныктайт, h_m – металлдын буусунун энтальпиясы. Металлдын буусунун жана плазманын өз ара аракеттешүү, алардын бири - бирине болгон таасири плазмадагы металлдын буусунун концентрациясы жана температуранын функциясы катары чөйрөнүн жылуулук физикалык касиеттери аркылуу аныкталат.

Диффузиянын коэффициентин аныктоо үчүн илешкектик жакындаштыруусу колдонулат.

Берилген жакындаштырууда диффузиялык коэффициент эсептелүүчү формула:

$$D_{Ar-Fe} = \frac{2\sqrt{2} \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{0.5}}{\left(\left(\frac{\rho_1^2}{\beta_1^2 \eta_1^2 M_1} \right)^{0.25} + \left(\frac{\rho_2^2}{\beta_2^2 \eta_2^2 M_2} \right)^{0.25} \right)^2} \quad (17)$$

бул жерде M_1, M_2 – плазма түзүүчү газдын жана металлдын мольдук салмагы; ρ_1, ρ_2, η_1 жана η_2 – газдын жана металлдын илешкектиги жана тыгыздыгы; эксперименталдык маалымат боюнча $\beta_1 = \beta_2 = 1.385$. Белгизис ω, ψ, h, χ маанилерине ээ φ функциясынын түзүмү C_1 – металлдын буусунун салмактык концентрациясынын мааниси менен толукталат.

4 - таблица. Канондук теңдемелеринин коэффициенттеринин маанилери

φ	a	b	c	e
C_1	1	$\rho r D$	1	0

Чек ара шарттары төмөнкүдөй белгиленет: металлдын буусунун концентрациясы катоддун каптал чегинде $C_1 = 0$; катоддун капталында: $C_1 = 0$; плазматрондун

каптал чегинде: $C_1 = 0$; мамычанын огунда симметрия шарты аткарылат: $\frac{\partial C_1}{\partial r} = 0$. Эрүү температурасынан жогору болгон аноддун үстүнкү бетиндеги металлдын буусунун концентрациясы төмөнкүдөй аныкталат:

$$C_1 = \frac{p_{v,1} M_1}{p_{v,1} M_1 + (p_{atm} - p_{v,1}) M_2}, \quad (18)$$

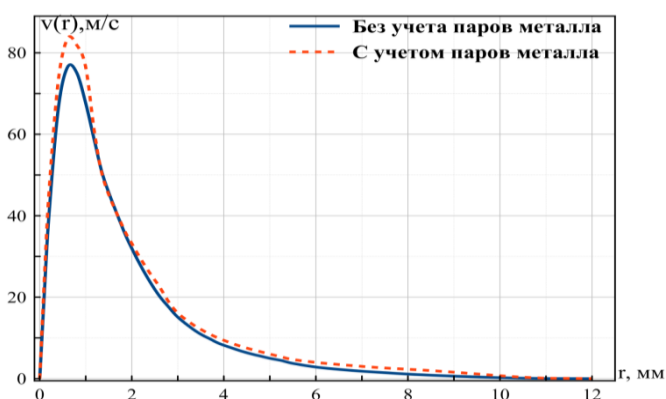
бул жерде $p_{v,1}$ - ширетүүчү ваннадагы эритилген металлдын температуралык функциясы болгон металлдын буусунун парциалдык басымы.

Ар кандай температурада металлдын буусунун басымын аныкташ үчүн Клапейрон – Клаузиустун жөнөкөйлөтүлгөн теңдемесин колдонсо болот жана эсептеп чыгууга ылайык болуш үчүн төмөндөгүдөй түргө келтирилет:

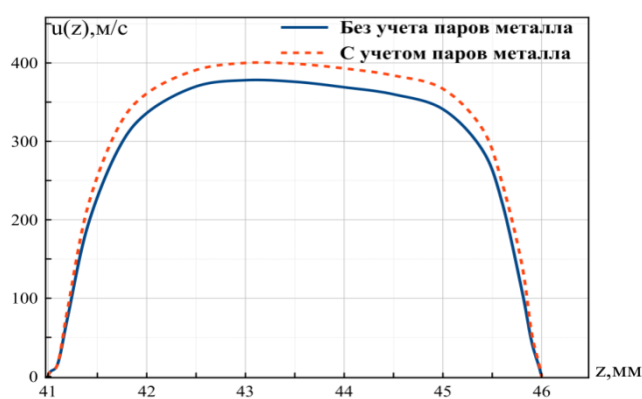
$$P_{vap} = P_{atm} \exp \left(\frac{-H_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{boi}} \right) \right), \quad (19)$$

бул жерде H_{vap} - буулануунун мольдук жылуулугу; R - универсалдык газ туруктуулугу; T_{boi} - нерсенин анодунун кайноо температурасы.

Аноддун чөйрөсүндө металлдын буусунун конвективдүү диффузия теңдемеси чыгарылбайт. Анод катары өзүнүн түзүмүндө 97%дан көбүрөөк болгон темирди камтыган болот пластинасы алынган. Компоненттердин таза касиеттеринин негизинде металлдын буусун кымтыган Ar+1% Fe, Ar+3% Fe аралашмалар үчүн ташуу коэффициеттери жана тең салмактуулук түзүмү эсептелип чыгарылды. Токтун күчү $I=150A$ жана $200A$ үчүн эсептөөлөр жүргүзүлдү. Токтун күчү $150A$ үчүн ширетүүчү ваннанын үстүнкү бетиндеги металлдын буусунун эң жогорку концентрациясы чек шарттардын негизинде 0.6%ды түздү, ал аргон жаасынын транспорттук коэффициеттерине иш жүзүндө таасир тийгизбейт. Токтун күчү $200A$ болгон учурдагы жаанын огунда металлдын буусунун эң жогорку концентрациясы 1.05 %ды түзөт. Металлдын буусунун концентрациясынын таралышы конвективдик жана диффузиялык агымдар менен аныкталат. Анодго багытталган газдын агымдарынын аксиалдык ылдамдыгы радиалдык ылдамдыктардан 5 эсе көп (7–8 - сүрөттөр), ошондуктан октун жанындагы бөлүктө металлдын буусу негизинен аноддун үстүнкү бетинде топтолгон. Ошондой эле ал диффузиянын коэффициенти менен байланыштуу, анын максималдык мааниси жаанын ядросунун чет жактарына туура келет, ал жерде металлдын атомдору электр жаасынын аймагына жеңил таралат.

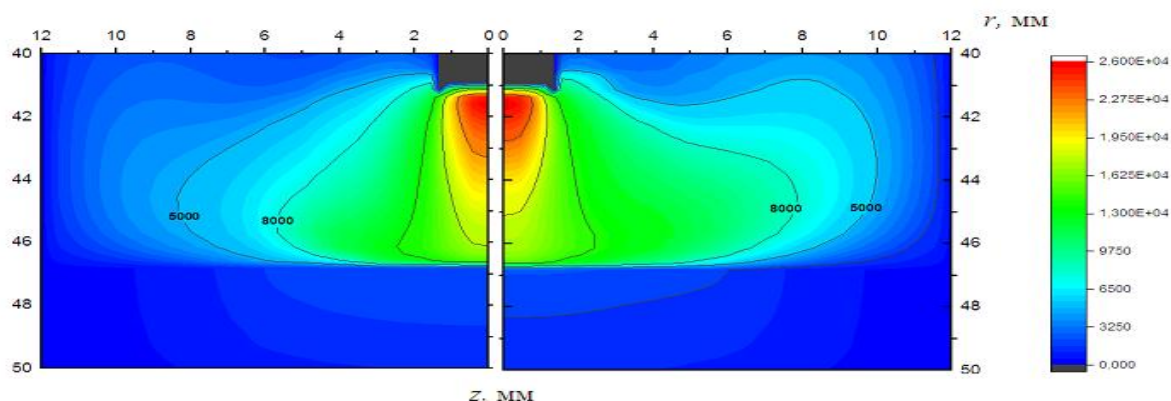


7 - сүрөт. Аноддун үстүнкү бетиндеги радиалдык ылдамдыктын таралышы.



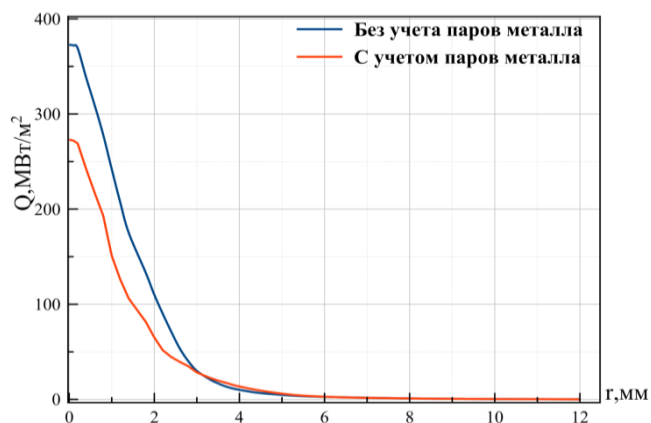
8 - сүрөт. Электрдик жаанын мамычасындагы октук аксиалдык ылдамдык.

Конвекция октун өзөгүндө басымдуулук кылып, ошондуктан металл буулары радиалдык багытта газ агымыдары менен таралып жана анодтун бети боюнча агат. 9 - сүрөттө токтун күчү $I = 200\text{A}$ болгондогу аргондук плазмадагы металлдын буусун эске алуу менен жана эске албагандагы температуранын изолиниялары берилген. Аноддун тегерегиндеги металлдын буусунун катышуусу жааны радиалдык багытта кысып, жаанын мамычасын чет жагынан муздатат жана жаанын ядросун ысытат. Ал төмөндөгүдөй түшүндүрүлөт, температуранын 5000K ден 13000K ге чейинки аралыкта аргондун металлдын буусу менен болгон аралашмасы үчүн нурдануу коэффициенти бир кыйла жогору, ал берилген аралыкта жаанын ичкеришине жана радиациялык жоготуунун жогорулашына алып келет. Кийинки жаанын чет жактарындагы муздашынын механизми жаа плазмасынын четтериндеги жылуулук диффузиясынан улам пайда болгон, 8000K ден төмөн температурадагы жылуулук өткөрүмдүүлүгүнүн көбөйүшү болуп саналат.

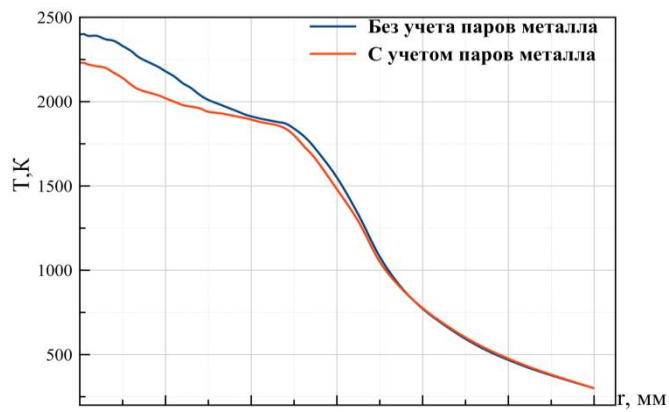


а) Металлдын буусун эске алганда б) Металлдын буусун эске албаганда
9 - сүрөт. Электрдик жаанын мамычасынын изотермалары $I=200\text{A}$.

Металлдын буусунун болуусу менен жаанын муздашына алып келген бул кубулуш $Lag - Lago F$ эмгектеринде келтирилген эксперименталдык жана теориялык жыйынтыктар менен туура келет. 10 - сүрөттө эки учурдагы электрдик жаанын мамычасынан анодго кеткен жылуулук агымдары көрсөтүлгөн. Металлдын буусу менен аргон үчүн жаанын ядросунун температурасы жогору болгондугуна карабастан, аноддо карай жылуулук агым таза аргон үчүн жогору, бул каралган температуралардын аралыгында жылуулук өткөрүүчүлүктүн жогорку коэффициенти менен шартталган. Ошентип, ширетүүчү ваннанын үстүнкү бетиндеги температурасы металлдын буусунун катышуусу менен төмөндөйт (11-сүрөт).

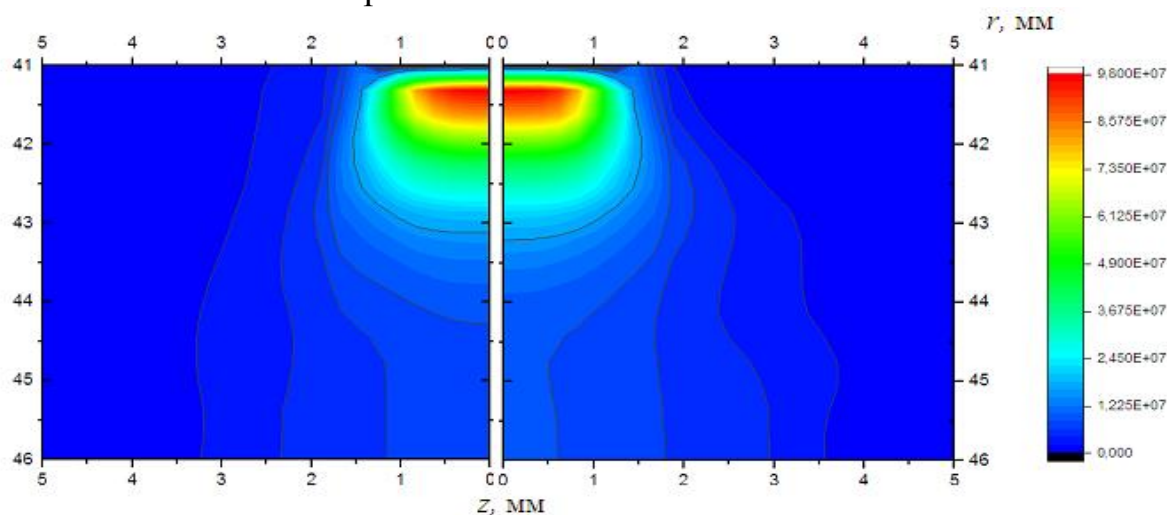


10 - сүрөт. Анодду көздөй жылуулук агымы.

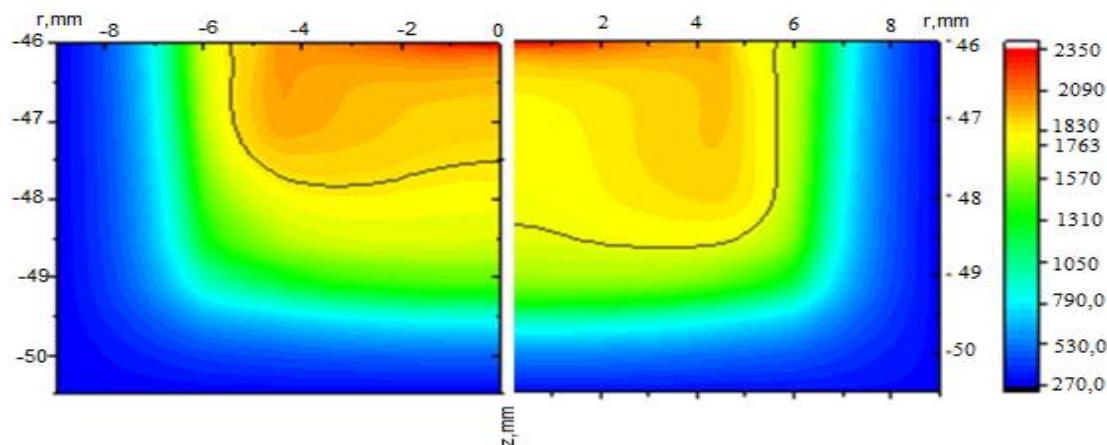


11 - сүрөт. Аноддун үстүнкү бетиндеги температура.

12 - сүрөттө жаанын мамычасындагы токтуң тыгыздыгынын графиги көрсөтүлгөн. Аноддун үстүнкү бетинде токтуң тыгыздыгы темирдин буусунун болуусу менен төмөндөйт, бул 10000K төмөн болгон учурдагы температурада буунун болуусу электрдик өткөрүмдүүлүктү жогорулатат жана электрдик ток жаанын муздагыраак аймагында өтүүсү менен шартталган. 13 - сүрөттө ширетүүчү ваннадагы эки учурдагы температуранын таралышы көрсөтүлгөн. Бууланууну эске алганда ширетүүчү ваннанын өлчөмдөрү, жаанын мамычасынан ширетүүчү ваннаны көздөй жылуулук агымынын азайышынан жана жаанын электр магниттик түзүмүнүн азайышынан эсебинени кичирейет.

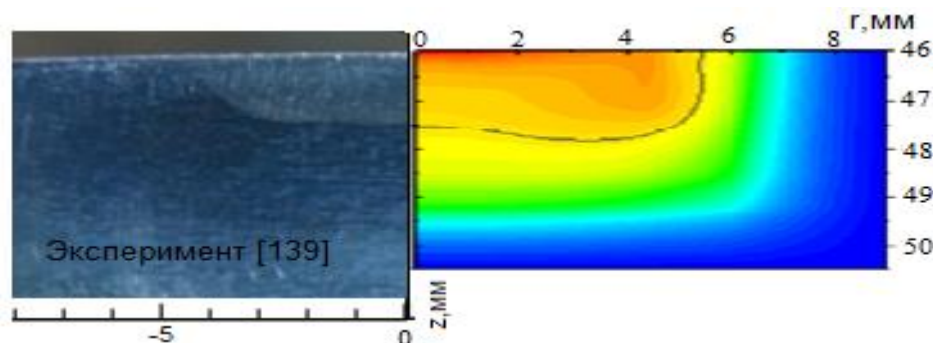


а) металлдын буусун эске алганда б) металлдын буусун эске албаганда
12 - сүрөт. Электрдик жаанын мамычасындагы токтуң тыгыздыгынын сызыктары $I=200A$.



а) металлдын буусун эске алганда б) металлдын буусун эске албаганда
13 - сүрөт. Ширетүүчү ваннадагы температуралардын таралышы.

14 - сүрөттө Фан Дингдин (Fan Ding) эмгегиндеги эксперименталдык ыкма менен алынган иштетилүүчү металлдын макрошлифи жана эритилген металлдын температурасынын таралышы көрсөтүлгөн. Салыштыруу эриген ваннасынын геометриялык өлчөмдөрү (тереңдиги \ туурасы) боюнча эксперименттин жана эсептеп чыгуунун жыйынтыктарынын канаттандырыларлык макулдашуусун көрсөтүп турат. Аноддун айланасындагы металлдын буусу менен аргондун аралашмасынын электрдик өткөрүмдүүлүгүнүн өзгөрүшү эки механизм менен түзүлөт. Биринчиден, металлдын буусунун катышы плазманын электрдик өткөрүмдүүлүгүн күчөтүшү керек.



14 - сүрөт. Аноддун макрошлифи – эрүүдөгү температуранын таралышы жана эксперимент.

Экинчиден, четирээк жагындагы электрдик өткөрүмдүүлүгүнүн көбөйүшүнөн жана жогорку радиациялык жоготуулардан келип чыккан жаанын муздатылышы аралашманын жалпы электрдик өткөрүмдүүлүгүнүн азайышына алып келет. Жыйынтыгында, электр магниттик түзүмдүн жаанын эритүү жөндөмдүүлүгүнө кошкон салымы азаят. Жогоруда келтирилген анализден мындай корутунду чыгарса болот, 150А ден жогорку ток учурунда жабык көлөмдө электрдик жаа ширетүүсүндө иштетилүүчү буюм менен электрдик жаанын өз ара аракеттенүүсүнүн физикалык кубулуштарын толугураак сүрөттөш үчүн аноддун үстүнкү бетиндеги металлдын буусун эске алуу зарыл.

Төртүнчү бөлүмдө бетти ысытуудагы жылуулук маселелери чыгарылды жана анын абалынын термодинамикалык талдоосу аткарылды. Ар кандай газдын курамынын эриген металлдар менен болгон аракеттешүүсүн изилдөө жана талдоо иштетилүүчү металлдын касиетине газ чөйрөсүнүн терс таасирин азайтууга шарт түзөт. Ушул максатта болоттун ар кандай маркаларынын иш чөйрөсү менен болгон аракеттешүүсүн термодинамикалык моделдештирүү Терра программасында жүргүзүлдү. Плазма пайда кылуучу газдын иштетилүүчү бет менен болгон аракеттешүүсүнүн термодинамикалык изилдөөсүнөн алынган жыйынтыктар, аракеттешүүгө катышкан компоненттерди сандык баалоого жардам берет жана анодго жакын областтагы процесстерге жана дагы иштетилүүчү беттин түзүмүнүн курамына тийгизген таасирин божомолдоого мүмкүндүк берет.

Мындан тышкары, иштетилүүчү аймактагы жылуулук процесстери жөнүндөгү негизги маалыматты иштетилүүчү материалдардын бетиндеги жылуулук режиминин жана температурасынын таралышын ар кандай материалдар үчүн энергия булагынын кубаттуулугунан, калыңдыгынан жана аракеттенүү убактысына жараша алууга да болот. Ошол себептүү жарым чексиз пластинанын бетиндеги ысытуу маселеси, белгилүү калыңдыктагы жылуулуктун таралуусун тегиздиктеги x , y координаттык огу боюнча кароого болот.

Беттин катмарындагы жылуулук берүү маселелерин математикалык баяндоо ысытууда чекиттик энергиянын булагынан алынган, жылуулук берүүнү эске албаган учурдагы эки өлчөмдүү туруктуу эмес жылуулук өткөрүмдүүлүк теңдемеси менен көрсөтүү мүмкүн:

$$\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q. \quad (20)$$

Ал үчүн баштапкы шарт: $T(x, y, 0) = T_0$; жана шарттары $T = T(x, y, t)$, $-l_m < y < l_m$, $0 < x < l_m$, $t > 0$, (21)

аткарылат. Убакыт t учурундагы чектик шарттар:

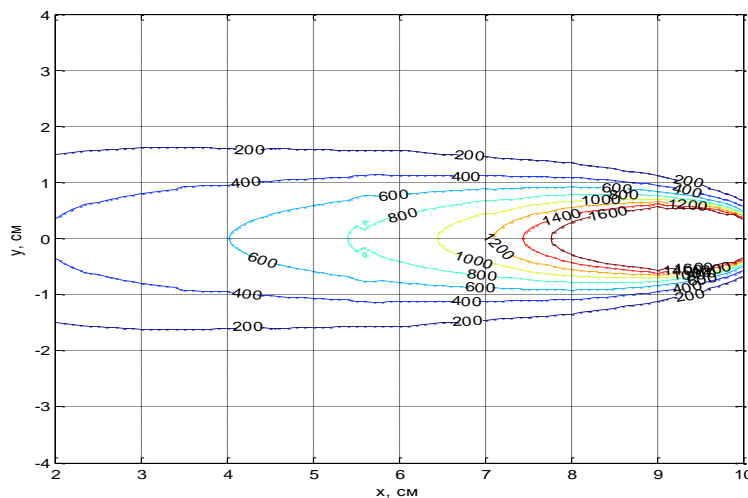
$$T(0, 0, t) = T_{пл}, T(l_m, 0, t) = T_0, T(0, \pm l_m, t) = T_0. \quad (22)$$

Ылдамдыгы ν болгон кыймылдагы булак үчүн (22) шарты төмөнкү түрдө кайра жазылат:

$$T(x, 0, t) = T_{пл}, T(x, \pm l_m, t) = T_0. \quad (23)$$

$\rho = \rho(T)$, $\lambda = \lambda(T)$, $c = c(T)$ таблицалык катыштары колдонулат. Булардын маанилеринин аныктоо интерполяция ыкмасы менен аткарылды.

Жылууулук өткөрүмдүүлүк теңдемесинин дискретизациялоо чектүү көлөмү ыкмасынын жардамы менен аткарылды. Алынган сызыктуу теңдемелер системасы өзгөрмөлүү багыт ыкмасы менен чыгарылды, бул так эсептөө ыкмаларынын жана Гаусс - Зейделдин итерация ыкмасынын комбинациясы болуп саналат. 15 - сүрөттө мисал катары эсептөөдөн алынган температура талаасынын таралышы көрсөтүлгөн.



15 - сүрөт. Температура талаасынын таралышы (болот 20 металлы).

Туруктуу эмес жылууулук өткөрүмдүүлүктүн маселесин чыгаруу ар кандай болоттун маркасы үчүн белгилүү бир убакыт аралыгына мүнөзүү болгон жогорку температурага жетүүсүн жана эрүү аймагынын ченемин жана түзүмдүк өзгөрүүгө алып келүүчү жылууулуктун таасирин аныктоого жардам берди.

КОРУТУНДУ

Диссертациялык изилдөө ишинин негизги жыйынтыктары төмөндөгүдөй:

1. Жаа плазмасынын мүнөздөмөлөрүнө иште пайдаланылган аралашманын компонентинин курамынын таасирин аныктоо үчүн салыштырмалуу сандык талдоо жүргүзүлгөн. Иште пайдаланылган аргон аралашмасынын активдүү газ компоненттери менен колдонууда, температура жаанын октук аймагында, таза аргонго салыштырганда дээрлик 4000K, аба менен салыштырганда 2000K жогорулашына алып келери аныкталды.

2. Эки өлчөмдүү туруктуу ЖТТ көз карашындагы математикалык модели, жаанын металл менен өз ара аракеттешүүсүндөгү беттеги өтүү шарттарын эске алуу менен МГД - теңдемелерин бирдиктүү системасынын негизинде аба чөйрөсү үчүн жаа - иштетүү зонасы эсептөө схемасында өнүктүрүлдү. Бирдиктүү моделдин негизинде алынган сандык эсептөөлөрдүн жыйынтыктары, жаа плазмасынын иштетилүүчү бетке тийгизкен аракетинин мүнөзүн аныктоого мүмкүндүк берди. Жумушчу газ катары абаны колдонгондо жаанын эритүү жөндөмдүүлүгү аргонго салыштырмалуу 1.3 эсе жогору экендиги аныкталды.

3. Электр жаа плазмасынындагы жана металлдын иштетилүүчү бетиндеги металлдын атомдорунун иштетилүүчү нерсенин бетинен буулануу кубулушун эске алуу менен бирдиктүү кароодогу эки өлчөмдүү стационардык математикалык модели өнүктүрүлдү. МГД теңдемелер системасы металл буусунун диффузиялык конвекциясынын теңдемеси менен толукталды.

4. Электр жаасынын көлөмүндөгү металл буусунун диффузия коэффициенти жана концентрациясы эсептелип чыгарылды. Конвекция октун тегерегинде басымдуулук кылары, ошондуктан металл буусу радиалдык багытта газ агымдары менен таралуусу жана аноддун бети боюнча агуусу аныкталды. Сандык изилдөөлөрдүн натыйжалары металл буусунун болушу жааны радиалдык багытта кысуу менен жаанын муздашына алып келерин белгилүү кылды. Сандык изилдөөлөрдүн жыйынтыгында металл буусунун болушу жаанын муздашына алып келери аныкталды. Бул кубулуш металл буусунун 5000Кден 13000К чейинки температуралык алкакта, нурлануу коэффициенти жогорулашы, бул алкакта радиациялык жоготууларынын көбөйүшү менен шартталган. Металл буусунун болушу менен электр өткөрүмдүүлүктүн жогорулашы жаанын муздашына жана жаанын эритүү жөндөмдүүлүгүндөгү электр магниттик түзүүчүнүн азайышына алып келери аныкталды.

5. Металл буусун эске алуу менен маселени чечүүдө жаадан чыккан жылуулук агымдын анодго карай 27%га төмөндөшү, аноддун бетинде температуранын 7%га төмөндөшүнө алып келери көрсөтүлдү.

Диссертациялык тема боюнча жарык көргөн эмгектердин тизмеси

1. **Аманкулова Н.А.** Плазмалык кесүү процессине математикалык моделдөө жолдору менен анализ жүргүзүү. [Текст] / Кабаева Г.Д., Аманкулова Н.А. // Жусуп Баласагын атындагы КМУ жарчысы, 3-серия: Табигый жана техникалык илимдер, физика жана техника, 30-чыг. – Бишкек, 2005, 138-141-б.

2. **Аманкулова Н.А.** Плазма пайда кылуучу газдын физикалык жылуулук касиеттеринин таасирин жана металлды кесүүдөгү кесүү процессинин пайда болушун баалоо [Текст] / Жайнаков А.Ж., Кабаева Г.Дж., Асанов Д.С. Аманкулова Н.А. Жусуп Баласагын атындагы КМУ жарчысы, 3-серия: Табигый жана техникалык илимдер, физика жана техника. 3-чыг. – Бишкек, 2005, 138-141-б.

3. **Аманкулова Н.А.** Плазмалык кесүү процессин компьютердик моделдөө. [Текст]. // Ж.Баласагын атындагы КМУ Жарчысы, 3-серия // Жайнаков А.Ж., Кабаева Г.Дж., Аманкулова Н.А., Алиев Р.Б., Тороев Ж. – Бишкек, 2007, 125-б.

4. **Аманкулова Н.А.** Эркин формага ээ электроддун жанындагы электр талаасынын чыңалуусун эсептөө [Текст] / Аманкулова Н.А., Жайнаков А.Ж., Асанов Д.С. // КМТУ жарчысы № 12 // – Бишкек, 2007, 131-135-б.

5. **Аманкулова Н.А.** Плазма жаасы менен материалдарды иштетүүдөгү жылуулук талааларынын таралышын анализдөө. [Текст] / Жалпы чөйрөлөрдүн механикасындагы заманбап көйгөйлөр, 8-чыг. // Аманкулова Н.А. – Бишкек, 2008, 172-179-б.

6. **Аманкулова Н.А.** Материалдарды плазмалык иштетүүнүн виртуалдык лабораториясын иштеп чыгуу [Текст] / Жайнаков А., Кабаева Г.Дж., Аманкулова Н.А. Жумалиев Ж.М. // КМТУ жарчысы, № 16. – Бишкек, 2009, 131-134-б.

7. **Аманкулова Н.А.** Металлдарды плазмалык кесүүдөгү тутумдаш жылуулук өткөрүмдүүлүк маселелерин компьютердик моделдөө [Текст] / Жайнаков А.Ж., Кабаева Г.Дж Аманкулова Н.А. // Ж.Баласагын атындагы КМУ жарчысы, 3-серия: Табигый жана техникалык илимдер, атайын чыгарылыш. – Бишкек, 2011, 125-129-б.

8. **Аманкулова Н.А.** Металлдарды плазмалык кесүүдөгү аба жаасынын параметрлерин эсептөө [Текст] / Кабаева Г.Дж. Аманкулова Н.А. // КМТУ жарчысы: “Илим жана билим берүүдөгү маалымат технологиялары жана математикалык моделдештирүү” эл аралык конф. материалдары. – Бишкек, 2011, № 24, 403-406-б.

9. **Аманкулова Н.А.** Тартылышкан аба жаасынын аноддун бетине жакын жердеги беттик кубулуштарын анализдөө [Текст] / Аманкулова Н.А. // “Жалпы чөйрөлөрдүн механикасындагы заманбап көйгөйлөр” эмгектери. – Бишкек, 2012, 88-93-б.

10. **Аманкулова Н.А.** Көп компоненттүү аба плазмасынын курамын эсептөө [Текст] / Аманкулова Н.А.// “Жалпы чөйрөлөрдүн механикасындагы заманбап көйгөйлөр”,15-чыг. // – Бишкек, 2012, 175-183-б.

11. **Аманкулова Н.А.** Тартылышкан аба жаасы учурундагы аноддун бетине жакын жердеги кубулуштарды изилдөө [Текст] / Кабаева Г.Дж Аманкулова Н.А. // Ж. Баласагын атындагы КМУ жарчысы.– Бишкек, 2013, 155-159-б.

12. **Аманкулова Н.А.** Аба-плазмалык кесүү процессиндеги анодго жакын жердеги кубулуштарды математикалык моделдөө [Текст] // А.Ж. Жайнаков, Г.Д. Кабаева, Аманкулова Н.А. / Zbornik radova konferencije MIT 2013. Matematicke i informacione tehnologije Beograd, april 2013, 290-300-б.

13. **Аманкулова Н.А.** Кесүү үчүн кысылган аба жаа плазмасынын мүнөздөмөлөрүн эсептөө [Текст] // А.Ж. Жайнаков, Г.Д. Кабаева, Н.А. Аманкулова // КМТУ жарчысы, № 34.– Бишкек, 2014, 579-582-б.

14. **Аманкулова Н.А.** Коргоочу газдардын түзүмүнүн электр жаа плазмасынын жана ширетүү ваннасынын касиеттерине тийгизген таасирин аныктоо. [Текст] // А.Ж. Жайнаков, Р.Т. Султангазиева, Аманкулова Н.А. Эсептөө технологиялары, Чогуу чыгарылыш, аль - Фараби атындагы КАЗУУ жарчысы, математика, механика, информатика сериясы, №3 (86). – Алматы, 2015, 208-215-б.

15. **Аманкулова Н.А.** Ширетүү ванасынан бөлүнүп чыккан металл буусунун электр жаа плазмасынын көрсөткүчтөрүнө тийгизген таасирин сандык моделдештирүү [Текст] // А.Ж. Жайнаков, Р.Т. Султангазиева, Аманкулова Н.А. Илимдеги иновациялар, № 11 (48). - Новосибирск, 2015, ноябрь. I-бөлүм, 7-23-б.

16. **Аманкулова Н.А.** Ширетүү ванасындагы металл буусунун электр жаа плазмасынын параметрлерине таасири [Текст] / Р.Т. Султангазиева, Н.А. Аманкулова // КМТУ жарчысы №3 (36). – Бишкек, 2015, 220 - 224-б.

17. **Аманкулова Н.А.** Жумушчу газдардын иштетилүүчү металлга жана электр жаасынын мүнөздөмөлөрүнө тийгизген таасирин сандык анализдөө [Текст] / Г.Дж. Кабаева, Р.Т. Султангазиева // «Илимдеги иновациялар» Новосибирск, № 1 (50) 2016, январь. II-бөлүм, 53-64-б.

18. **Аманкулова Н.А.** Көп компоненттүү иш чөйрөлөрүнүн курамынын жаа плазмасына тийгизген таасири [Текст] / А.Жайнаков, Г.Дж. Кабаева // КР УИА физика илимий журналы, №1. – Бишкек, 2016, 133-139-б.

Аманкулова Нургүл Асимкановнанын «Плазманын электр жаа агымынын иштетилүүчү бет менен өз ара аракеттешүүсү» деген темадагы 01.02.05 – Суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы 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.

Изилдөөнүн объекти: плазматрондо түзүлгөн электр жаа плазма агымы жана электр жаасы эриткен анод металлынын эриген агымы.

Иштин максаты: электр жаа плазмасынын жергиликтүү термодинамикалык тең салмактуу (ЖТТ) абалындагы жаа плазмасында жана иштетилүүчү металлда өтүүчү эрүү жана буулануу процесстерин эске алуу менен бирге кароонун эки өлчөмдүү туруктуу математикалык моделдештирүү ыкмасын өнүктүрүү.

Изилдөө ыкмалары: математикалык моделдештирүү, сандык эксперимент.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылыктары:

– Жаа плазмасынын мүнөздөмөлөрүнө иште пайдаланылган аралашманын компонентинин курамынын таасирин аныктоо үчүн салыштырмалуу сандык талдоо жүргүзүлгөн. Иште пайдаланылган аргон аралашмасынын активдүү газ компоненттери менен колдонууда, температура жаанын октук аймагында, таза аргонго салыштырганда дээрлик 4000K, абаменен салыштырганда 2000K жогорулашына алып келери аныкталды.

– Бирге короо моделдин негизинде аба жана аргон чөйрөсүндөгү жаа плазмасынын металлдын иштетилүүчү бетине тийгизген электр магниттик жана жылуулук таасирлеринин мүнөздөрүн аныктоонун сандык эсептөөлөрү аткарылды. Аргонго салыштырганда аба жаасы дээрлик кысылган жана туурасынан кеткен өлчөмүнүн кичине болушу, иштетилүүчү нерсеге жылуулук жана күч таасирлеринин жогору болушуна шарт түзөт деп аныкталды.

– Металлдын иштетилүүчү бетинен чыккан металл атомдорунун буулануу кубулушун эске алуу менен ширетүү ваннасындагы жана электр жаасындагы процесстерди кароо үчүн жергиликтүү термодинамикалык теңсалмактуу (ЖТТ) абалындагы эки өлчөмдүү туруктуу математикалык модели өнүктүрүлдү. Металл буусунун болушу менен электр өткөрүмдүүлүктүн өзгөрүүсү жаанын муздашына жана эритүү жөндөмдүүлүгүнүн электр магниттик түзүмүнүн азайышына алып келери аныкталды.

– Металл буусун эске алып тапшырманы чечүүдө жаадан чыккан жылуулук агымынын анодго карай 27% азайышы, аноддун бетинде температуранын 7% төмөндөшүнө алып келүүсү көрсөтүлөт.

Колдонуу аймагы: Жыйынтыктарды электр жаа агымынын жардамы менен ар кандай беттерди иштетүүдө материалдарды иштетүү технологиялык процесстеринде колдонулуучу плазматрондордун иштөө шартын оптималдаштыруу максатында колдонсо болот. Ошондой эле жыйынтыктар окуу процессинде «Математикалык моделдештирүү», «Металлургиялык процесстерди математикалык моделдештирүү» сабактарынан окутууга сунуштоого болот.

РЕЗЮМЕ

диссертации Аманкуловой Нургул Асимкановны на тему: «Взаимодействие электродуговых потоков плазмы с обрабатываемой поверхностью» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Ключевые слова: электромагнитные, тепловые и газодинамические явления в дуговой плазме, обрабатываемый металл, численное моделирование, пары металлов.

Объект исследования: электродуговой поток плазмы, формируемый плазматроном и потоки жидкого металла анода, расплавленного дуговой плазмой.

Цель работы: усовершенствование двумерной стационарной математической модели электрических дуг в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) плазмы для совместного рассмотрения процессов в дуговой плазме и на поверхности обработки металла с учетом его плавления и испарения.

Методы исследования: математическое моделирование, численный эксперимент.

Полученные результаты и их новизна:

– Проведен сравнительный численный анализ влияния компонентного состава рабочей смеси на характеристики дуговой плазмы. Установлено, что применение рабочей смеси аргон + активные компоненты газов, приводит к росту температуры в приосевой области дуги в сравнении с аргоном на 4000К, в сравнении с воздухом на 2000К.

– Выполнены численные расчеты на основе единой модели, позволяющие установить характер электромагнитного и теплового воздействия дуговой плазмы в среде воздуха и аргона на обрабатываемую поверхность. Установлено, дуга в воздухе более сжата и меньшие поперечные размеры дуги обуславливают большее тепловое и силовое воздействие на обрабатываемое изделие в сравнении с аргоном.

– Усовершенствована двумерная стационарная математическая модель с позиций ЛТР, для рассмотрения процессов в электрической дуге и в объеме сварочной ванны с учетом явления испарения атомов металла с поверхности обрабатываемого изделия. В результате численного исследования установлено, что присутствие паров металла приводит к охлаждению дуги.

– Показано, что при решении задачи с учетом паров металла тепловой поток от дуги в сторону анода уменьшается на 27%, что приводит к уменьшению температуры на поверхности анода на 7%.

Область применения: Полученные результаты могут быть использованы при исследовании процессов обработки различных поверхностей электродуговыми потоками энергии с целью оптимизации режимов работы плазматронов, в технологических процессах обработки материалов. Результаты исследований могут быть рекомендованы для применения в учебном процессе по дисциплинам «Математическое моделирование» и «Математическое моделирование металлургических процессов».

SUMMARY

dissertation Amankulova Nurgul Asimkanovny on the theme: "Interaction of electric arc plasma flows with the treated surface" for the degree of candidate of physical and mathematical sciences on a specialty 01.02.05 - Mechanics of liquid, gas and plasma

Keywords: arc plasma flows, processed metal, numerical simulation, a single model, a pair of metal.

Object of research: arc plasma stream generated by plasma torch and flows of liquid metal anode, melted by an electric arc.

Purpose of work: improvement of two-dimensional steady-state mathematical model of electric arcs in the approximation of local thermodynamic equilibrium (LTE) plasma for joint review processes in the arc plasma and on the surface of metal processing, taking into account its melting and evaporation.

Methods: mathematical modeling, computational experiment.

The results and their novelty:

- A comparative numerical analysis of the effect of the component composition of the working mixture in the characteristics of the plasma arc. It is found that the use of a mixture of argon working gas + active component leads to an increase of temperature in the axial region of the arc in comparison with argon at 4000K, as compared with the air at 2000K.

- Numerical calculations based on a single model, allowing to establish the nature of the electromagnetic and thermal effects of the arc plasma in air and argon on the surface. It was established arc in the air more compressed and smaller cross-sectional dimensions of the arc cause more heat and a force on the workpiece in comparison with argon.

- Improved two-dimensional mathematical model of a stationary position with LTE, for the consideration of the processes in the arc and weld pool in volume, taking into account the phenomenon of evaporation of metal atoms from the surface of the workpiece. The numerical study found that the presence of metal vapor arc resulting in cooling.

- Shown that solving the problem of metal vapor given heat flow from the arc toward the anode is reduced by 27%, resulting in a reduced temperature at the anode surface is 7%.

Scope: The results can be used for studying the treatment of various surfaces for the electric energy flows to optimize the plasmatron operating modes, in materials processing technology processes. The research results can be recommended for use in the educational process in the disciplines of "Mathematical Modeling" and "Mathematical modeling of metallurgical processes."

АМАНКУЛОВА НУРГУЛ АСИМКАНОВНА

**ПЛАЗМАНЫН ЭЛЕКТР ЖАА АГЫМЫНЫН
ИШТЕТИЛҮҮЧҮ БЕТ МЕНЕН
ӨЗ АРА АРАКЕТТЕШҮҮСҮ**

01.02.05 – Суюктуктун, газдын жана плазманын механикасы

Физика-математика илимдеринин кандидаты
окумуштуулук даражасын алуу үчүн жазылган диссертациянын
авторефераты

Басууга 2016-ж. 29.12. кол коюлду.
Форматы 60x84 1/16. Көлөмү 1.25 б.т.
Офсеттик кагаз. Офсеттик басуу.
150 даана чыгарылды. 345-заказ.

720020, Бишкек ш., Малдыбаев көч.,34б,
Н. Исанов атындагы Кыргыз мамлекеттик курулуш,
транспорт жана архитектура университети

