6. Шоек, П. А. Исследование баланса энергии на аноде сильноточных дуг, горящих в атмосфере аргона / П. А. Шоек // Современные проблемы теплообмена / под ред. Б. С. Петухова. - М.; Л.: Энергия, 1966. - С. 110–139.
7. Ершов, А. В. Приближенный анализ прианодных процессов с учетом отрыва электронной температуры / А. В. Ершов, И. Г. Паневин // 5-я Всесоюзная конференция по генераторам низкотемпературной плазмы: тезисы докладов. - Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1972. - Ч. 2. - С. 7–11.
8. Токтогонов, С. А. Влияние условий фокусировки лазерного излучения на форму каверны испарения в металле / С. А. Токтогонов, Э. С. Чокоев // Взаимодействие излучения, плазменных и электронных потоков с веществом: тезисы докладов 4-й Всесоюзной конференции. - Фрунзе, 1990. - С. 5–6.
9. Коробова, И. Л. Прианодный слой сильноточной дуги высокого давления / И. Л. Коробова, В. Я. Мойжес, В. А. Немчинский, Л. Н. Перетц // 6-я Всесоюзная конференция по генераторам низкотемпературной плазмы: тезисы докладов. - Фрунзе: Илим, 1974. - С. 297–300.
10.Немчинский, В. А. Прианодный слой сильноточной дуги высокого давления / В. А. Немчинский, Л. Н. Перетц // Журнал технической физики. - 1977. - Т. 47, № 9. - С. 1868–1875.
11.Dinulescu, H. A. Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs / H. A. Dinulescu, E. Pfender // Journal of Applied Physics. - 1980. - Vol. 51, № 6. - P. 3149–3157.
12.Ершов, А. В. Исследование прианодных процессов в сильноточных разрядах высокого давления / А. В. Ершов, И. П. Назаренко, П. Г. Паневин // Экспериментальные исследования плазмотронов / под ред. М. Ф. Жукова. - Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1977. - С. 340–356.
13.Корнеев, А. С. Расчетные характеристики неравновесного анодного слоя в аргоне / А. С. Корнеев, И. П. Назаренко, И. Г. Паневин // 10-я Всесоюзная конференция по генераторам низкотемпературной плазмы: тезисы докладов. - Минск: ИТМО АН БССР, 1986. - Ч. 2. - С. 144–145.
14.Назаренко, И. П. Анализ характеристик прианодных процессов в аргоновых дуговых разрядах высокого давления / И. П. Назаренко, И. Г. Паневин // Генерация потоков электродуговой плазмы / под ред. В. Е. Накорякова. - Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1987. - С. 213–225.

Рецензент: физика-математика илимдеринин доктору, профессор Курбаналиев А.Ы.

УДК 533:519.63:536.7
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-463-439

Усенканов Дж.О., Бакирова Н.М., Жолдошбек кызы А.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Усенканов Дж.О., Бакирова Н.М., Жолдошбек кызы А.
КНУ имени Жусупа Баласагына
Usenkanov Dzh.O., Bakirova N.M., Zholdoshbek kyzy Alina
KNU J. Balasagyn

ЭЛЕКТР ШИРЕТҮҮ ЖААСЫНЫН ПЛАЗМА АГЫМЫНЫН ЧЕКТҮҮ РЕЖИМДЕРИНДЕГИ МҮНӨЗДӨМӨЛӨРҮ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРОЧНОЙ ДУГИ ПРИ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМЫ
CHARACTERISTICS OF THE WELDING ARC AT THE LIMIT MODES OF ELECTRIC ARC PLASMA FLOW

Кыскача мүнөздөмө: Магниттик газ динамикасынын (МГД) теңдемелеринин негизинде газдын сарпталышына жана ток күчүнө жараша кысылган электр жаасынын мүнөздөмөлөрү эсептелди. МГД

теңдемелеринин сандык чыгарылышы «ылдамдык–басым» өзгөрмөлөрүндө аткарылып, «уюлдук–агым функциясы» өзгөрмөлөрүндөгү эсептөөлөрдүн натыйжалары менен салыштырылды. Эксперименттик маалыматтар менен жакшы дал келген ламинардык агымдын туруктуулук аймагы аныкталды.

Аннотация: На основе уравнений магнитной газовой динамики (МГД) проведён расчёт характеристик сжатой электрической дуги в зависимости от расхода газа и силы тока. Численное решение уравнений МГД выполнено в переменных «скорость–давление» и сопоставлено с результатами расчёта в переменных «завихрённость–функция тока». Определена область устойчивости ламинарного потока, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными.

Abstract: Based on the equations of magnetohydrodynamics (MHD), the characteristics of a compressed electric arc were calculated depending on the gas flow rate and current strength. The numerical solution of the MHD equations was performed using the “velocity–pressure” variables and compared with the calculation results obtained using the “vorticity–stream function” variables. The stability region of the laminar flow was determined and shown to be in good agreement with experimental data.

Негизги сөздөр: электр жаасы; анод; эритилген металл; анодго жакын процесстер; кондуктивдүү жылуулук агымы; конвективдүү жылуулук агымы; магнитогидродинамикалык теңдемелер системасы; сандык чыгарылыш; көлөмдүк заряд.

Ключевые слова: электрическая дуга; анод; расплавленный металл; прианодные процессы; кондуктивный тепловой поток; конвективный тепловой поток; система магнитогидродинамических уравнений; численное решение; объёмный заряд.

Keywords: electric arc; anode; molten metal; near-anode processes; conductive heat flux; convective heat flux; system of magnetohydrodynamic equations; numerical solution; space charge.

Киришүү. Каналдагы жаа плазмасынын агымынын өнүгүү закон ченемдүүлүктөрүн изилдөө жана газдын сарпталышына, токтун күчүнө жараша ламинардык агым режиминин туруктуулугун изилдөө турбуленттүүлүктүн дүүлүгүү механизмдерин жана агымдын турбуленттүү режимге өтүү шарттарын түшүнүү жагынан кызыктуу [1; 3]. Электр жаалуу газ жылыткычтардын каналдарында агым режимин орнотууда Джоуль жылуулук бөлүнүп чыгышы, электромагниттик өз ара аракеттенүү, нурлануунун ташылышы, плазманын өзүнүн туруксуздуктарынын өнүгүшү [1] чоң роль ойнойт, бул турбуленттүүлүктүн дүүлүгүү механизмдерин татаалдаштырат, жана гидродинамикалык Рейнольдс саны Re бул өтүүнүн жалгыз критерийи эмес. [2] эмгегинде белгиленгендей, ламинардык агымда да температуранын жана плазманын башка мүнөздөмөлөрүнүн пульсациялары пайда болот. Агымдын структурасына жаа разрядынын параметрлери, каналдын геометриясы, плазма түзүүчү газдын курамы, аны каналга берүү ыкмалары ж.б. олуттуу таасир этет. Газдын ламинардык агымдарынын туруктуулук теориясын өнүктүрүүдөгү айрым ийгиликтерге карабастан [4], электр жаалуу плазма генераторлорунун каналдарында турбуленттүүлүктүн пайда болушун аныктоочу критерийлер азырынча изилдене элек [5].

Гидродинамикалык теңдемелердин сызыктуу эместиги жана жогорку туундулардагы кичинекей параметрлердин болушу (чоң Re сандары) аларды аналитикалык изилдөөдө да, сандык интеграциялоодо да белгилүү кыйынчылыктарды жаратат. Ошону менен бирге, каналдагы газ агымынын маселесинде берилген стационардык шарттарда гидродинамикалык теңдемелердин стационардык чыгарылышы бар, ал Рейнольдс сандарынын каалаган маанисинде ишке ашат [6]. Муну көптөгөн эксперименттер да тастыктайт, мында каналдын кире беришиндеги дүүлүгүүлөрдү азайтуу менен ламинардык агым режиминен турбуленттүү режимге өтүүнү өтө жогорку Re сандарына чейин «созууга» болот [7]. Мындай «идеалдуу» агым шарттары Навье-Стокс теңдемелеринин стационардык чыгарылыштары менен тиешелүү чек ара шарттарын тандоо аркылуу сүрөттөлөт. Бирок, теңдемелердин ар бир чыгарылышы практикада ишке аша бербейт. Бул бардык реалдуу стационардык агымдар гидродинамикалык теңдемелерди канааттандыруу менен бирге, кичинекей дүүлүгүүлөргө

карата туруктуу болушу керек экендиги менен байланыштуу. Эгерде газ агымында пайда болгон канчалык кичинекей болбосун дүүлүгүүлөр убакыттын өтүшү менен өсүүгө умтулса, анда кыймыл туруксуз болуп, стационардык түрдө жашай албайт. Ушундай эле көз карандылык плазмотрондун каналындагы газ агымында да байкалат [8]: агымдын кичинекей ылдамдыктарында жаа туруктуу күйөт жана стационардык агым ишке ашат, ал эми чыгымдын көбөйүшү менен (каналга газ киргизүү ылдамдыгы) туруктуулук бузулуп, стационардык агым ишке ашпайт. Каналда көңдөйлөрдүн, тепкичтердин, диафрагмалардын ж.б. болушу, алар табигый дүүлүгүү факторлорунун ролун ойноп, газдын сарпталышы көбөйгөндө туруктуу ламинардык агымды ишке ашыруу мүмкүнчүлүгүн чектейт. Бул ламинардык жана турбуленттүү агым режимдеринин ортосунда так чек аранын пайда болушуна алып келиши керек, муну натурдук жана эсептөө эксперименттери да көрсөтөт.

Бул эмгекте эки өлчөмдүү МГД теңдемелеринин негизинде, табигый (ылдамдык-басым) өзгөрмөлөрүн колдонуу менен, кысылган ширетүүчү жаанын плазма агымынын мүнөздөмөлөрү эсептелет жана мурда жүргүзүлгөн сандык («куюн-ток функциясы» өзгөрмөлөрүндө) жана эксперименталдык изилдөөлөр менен турбуленттүүгө жакын режимдерде салыштырылат.

Иштин максаты – газдын сарпталышын жана токтун күчүн өзгөртүүдө сандык чечимдин туруктуулук аймагын аныктоо, жана каналдын берилген геометриясы үчүн алардын ламинардык агым режиминин турбуленттүүгө өтүү шарттарын канааттандырган чектелүү маанилерин белгилөө.

Модель. Электр жаасынын эсептөө схемасы, күтүүсүз кеңейүүсү бар кууш цилиндрдик каналда күйүп жаткан, 1-сүрөттө көрсөтүлгөн. Плазма түзүүчү газ катоддун жумушчу учу менен соплонун жогорку кесилишинин ортосундагы жаа разрядынын аймагына радиалдуу түрдө берилет, каналда ысытылат жана жалпак аноддун бетинде андан ары жайылып, плазма агымы түрүндө бош мейкиндикке чыгат. Газдын агымын жана ысышын сүрөттөө үчүн, жүрүп жаткан процесстер стационардык, агым ламинардык жана октук-симметриялуу, нурлануу көлөмдүк, плазма жергиликтүү термодинамикалык тең салмактуулук абалында деп болжолдонот. Үзгүлтүксүздүк, Навье-Стокс, энергия балансы, Максвелл жана Ом закондору МГД теңдемелер системасы [1] түрүндө жазылат:

$$\nabla \cdot \left(\rho \vec{V}\right) = 0,$$

$$\rho\left(\vec{V} \cdot \nabla\right)\vec{V} = -\nabla\left(P + \frac{2}{3}\eta \nabla \cdot \vec{V}\right) + 2\nabla \cdot \left(\eta \dot{S}\right) + \vec{J} \times \mu\vec{H},$$

$$\rho C_P\left(\vec{V} \cdot \nabla\right)T = \vec{V} \cdot \nabla P + \vec{J} \cdot \vec{E} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \psi,$$

$$\nabla \times \vec{E} = 0, \qquad \nabla \times \vec{H} = \vec{j}, \vec{j} = \sigma\vec{E}.$$

Система жаа тогунун жана газдын сарпталышынын сакталуусунун интегралдык катыштары менен толукталат:

$$I = 2\pi \int_0^R j_x r dr, \qquad G = 2\pi \int_0^R \rho u r dr$$

жана ташуу коэффициенттеринин жана плазманын жылуулук-физикалык касиеттеринин температурага жана басымга көз карандылыктары менен [1].

Белгилөөлөр: $\vec{V}(v, 0, u)$ - ылдамдык, $\vec{j}(j_r, 0, j_z)$ - электр тогунун тыгыздыгы, $\vec{E}(E_r, 0, E_z), \vec{H}\left(0, H_\varphi, 0\right)$ - электр жана магнит талааларынын чыңалыштары, T, P - температура жана басым, μ - магниттик туракттуулук, $\dot{S}$ - деформация ылдамдыктарынын тензору, $\rho, \sigma, \lambda, \eta, \psi, C_P$ - тиешелүүлүгүнө жараша тыгыздык, электр өткөргүчтүк, жылуулук өткөргүчтүк, илээшкектүүлүк, нурлануу жөндөмдүүлүгү жана салыштырма жылуулук сыйымдуулугу. r, z, φ индекстери - цилиндрдик координаталар системасынын окторуна, R - дубалдагы маанилерге туура келет.

МГД теңдемелерин физикалык өзгөрмөлөрдө сандык чечүүдө система дивергенттик формага келтирилет жана октук симметрияны эске алуу менен цилиндрдик координаталар системасында жалпыланган түрдө жазылат: $\frac{\partial}{\partial r}\left(C_\phi v\phi - D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(C_\phi u\phi - D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r}\right) + S_\phi$, мында $\phi = \left(T, \chi = rH_\phi, v, u, P\right)$ өзгөрмөсү жана сызыктуу эмес C_ϕ, D_ϕ, S_ϕ коэффициенттеринин маанилери баштапкы МГД теңдемелерине ылайыктуулугунан аныкталат. Ошол эле учурда Ом закону жана Максвелл

теңдемелери электр тогунун $\chi = rH_\varphi$ функциясы үчүн теңдемеге келтирилет.

Ар бир көз каранды өзгөрмө ($\phi = v, u, P, T, \chi$) үчүн чек ара шарттары анын эсептөө аймагын чектеген жабык контур боюнча берилет. Каналдын кире беришиндеги ылдамдыктын жана электр тогунун функциясынын баштапкы бөлүштүрүлүшү токтун күчүнүн, газдын чарпталышынын, каналдын геометриялык параметрлеринин жана газдын $T = T_R$ температурасынын берилген маанилери боюнча бир өлчөмдүү МГД теңдемелеринин чыгарылышынан аныкталат. Каналдын муздатылган дубалдарында жана электроддордо жабышуу жана өткөрбөө шарттары, окто – симметрия шарттары колдонулат. Эркин чек арада газдын нормалдуу агып кирүү-чыгуу шарттары колдонулат, басым атмосфералык. Катоддун бетине жакын жерде температуранын бөлүштүрүлүшү жана жаанын электродго байланыш радиусу боюнча эксперименталдык маалыматтар колдонулат. Жаанын аноддук байланышынын өлчөмдөрү жана жайгашуусу, токтун тыгыздыгынын жана плазманын температурасынын электродго жакын бөлүштүрүлүшү жылуулук, электромагниттик жана газ динамикалык мүнөздөмөлөрдүн өз ара макулдашылган аракеттенүүсүнүн натыйжасы катары сандык эсептөө процессинде аныкталат.

Белгилөөлөр: $\vec{V}(v, u, 0)$ - ылдамдык, T - температура, h - энтальпия, P - басым, $\vec{H}(0, 0, H_\varphi)$ - магнит талаасынын чыңалышы, $\vec{j}(j_r, 0, j_z)$ - электр тогунун тыгыздыгы, μ - магниттик турактуулук, $\rho, \sigma, \lambda, \psi, \eta, C_P$ - тиешелүүлүгүнө жараша тыгыздык, электр өткөргүчтүк, жылуулук өткөргүчтүк, нурлануу жөндөмдүүлүгү, илээшкектүүлүк жана туруктуу басымдагы салыштырма жылуулук сыйымдуулук, R - каналдын тышкы радиусу. r, z, φ индекстери цилиндрдик координата системасынын октору на туура келет, R дубалга, k - катодго.

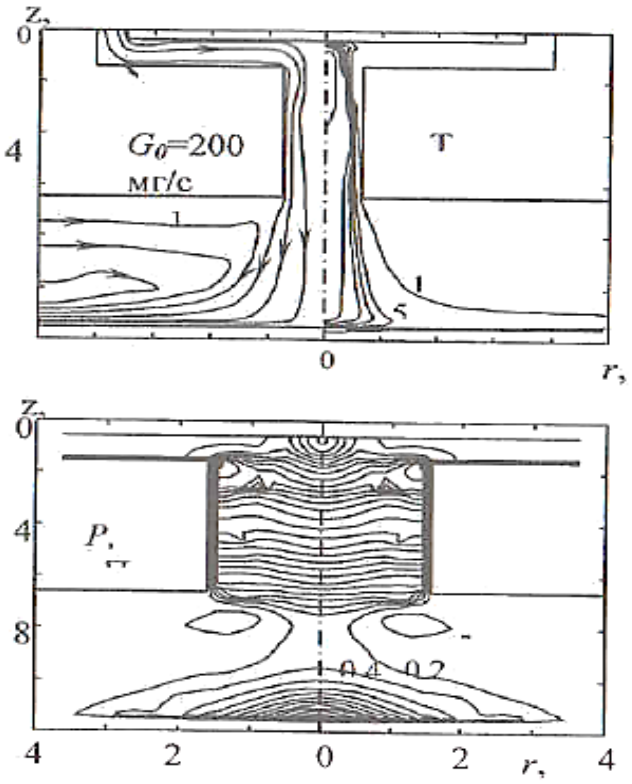
Дифференциалдык теңдемелерди чыгаруу чектик айырмалар ыкмасы менен жүргүзүлөт. Теңдемелерди дискретизациялоо тегиз эмес тордо консолдук көлөм ыкмасы менен ишке ашырылат, теңдемелердин дискреттик аналогдорунда контролдук көлөмдөрдүн четтериндеги ташуу коэффициенттери гармоникалык орточо маани менен аныкталат, бул жылуулук маселесин үзгүлтүксүз эсептөөгө мүмкүндүк берет, анын ичинде электрод жана каналдын дубалдары, чөйрөлөрдүн бөлүнүү чегинде конъюгаттык жылуулук алмашуу шарттарын автоматтык түрдө аткаруу менен. Айырма теңдемелерин чыгарууда итерация, төмөнкү релаксация жана радиалдык багыттагы прогонка ыкмалары колдонулат. Агым талаасы SIMPLE алгоритминин жардамы менен эсептелет [9].

Эсептөө натыйжалары жана аларды талкуулоо. Жаанын агымынын мүнөздөмөлөрүн эсептөө үчүн төмөнкү параметрлер берилет (1-сүрөт): $G = 100 \div 250$ мг/с, $I = 50 - 100\ A, T_R = 300K$, чыгуудагы басым $P_0 = 0{,}1$ МПа, каналдын узундугу жана радиусу 6 мм, $R = 1{,}5$ мм, электроддор аралык аралык 10 мм, доганын катодго жабышуу радиусу $R_k = 1$ мм. Плазма түзүүчү газ катары аргон жана көмүр кычкыл газы колдонулат.

Токтун күчүнүн жана газдын чыгымынын чектик маанилеринин аймагындагы алынган эсептөөлөрдүн туруктуулугун карап көрөлү (белгилей кетсек, $G > 210$ мг/с ($I = 70\ A$, газ - CO_2) учурунда эсептөөгө төмөнкү релаксация параметрин $0.05 - 0{,}1$ тандоо менен жетишилген).

Эсептөө эксперименттери көрсөткөндөй, $G \leq 210$ мг/с ($I = 70\ A$, газ - CO_2) сарпталышында сандык эсептөөнүн майда дүүлүгүүлөрү тез басаңдайт жана агымдын сүрөтүн бузбайт, бул алынган эсептөөнүн туруктуулугун көрсөтөт. Бул шарттарда агымдын пайда болушу негизинен молекулярдык эффекттер менен аныкталат жана молекулярдык илээшкектүүлүктүн чоңдуктары бул агымдарды гидродинамикалык жана сандык жактан туруктуу кылуу үчүн жетиштүү.

Башка сүрөт $G > 210$ мг/с учурунда байкалат: итерациялар процессинде дүүлүгүүлөр күчөп, агымдын структурасын олуттуу өзгөртөт. Итерациялык циклде агым параметрлеринин пайда болушу башаламан осцилляциялык мүнөзгө ээ. Мындай «туруксуз» аралык эсептөөлөрдүн жүрүмү баштапкы математикалык моделге туура келбейт, ал эми эсептөө алгоритми өзүнүн демпфирлөөчү касиеттерин жоготот. Бул $G > 210$ мг/с ($I = 70A$) учурунда молекулярдык диссипативдик механизм конвергенттүү эсептөөнү камсыз кылбайт, ал эми илээшкектүүлүктүн чоңдуктары ламинардык агымды турукташтыруу үчүн жетишсиз болуп, ал турбуленттүү болуп калат дегенди билдирет.



1-сүрөт. Газдын ток сызыктары $(G/G_0 = 0.05, 0.3, 0.9, 1.5, 2, 2.5)$, изотермалар $(T = 1, 5, 8, 10, 12, 15\ kK)$ жана басым талаасы (кадам $0.2k$Па);); $I = 70A$

Майда дүүлүгүүлөрдүн өсүшүнүн натыйжасында осцилляциялык чыгарылыштардын пайда болушун турбуленттүүлүккө өтүү катары кароого болот. Турбуленттүүлүктүн мындай өнүгүшү [6; 10; 11] эмгектеринде $Re > Re_{кр}$ сандары учурунда алынган. Жаанын агымынын мүнөздөмөлөрүнүн осцилляция зонасы эркин агым зонасында байкалат, ал эми жаа дубалдар менен катуу кысылган каналдын ичинде агымдын структурасы өзгөрбөйт жана бул аймак гидродинамикалык дүүлүгүлөргө карата эң туруктуу болуп саналат.

Белгилей кетсек, ламинардык моделдин алкагында эсептөө алгоритми принцип боюнча $G = 250$ мг/с $(I = 70\ A,$ газ $- \ CO_2)$. учурунда да конвергенттүү чыгарылышты алууга мүмкүндүк берет. Бирок, бул учурда эсептөөлөрдүн туруктуулугу үчүн контролдук көлөмдөрдүн өлчөмдөрүн азайтуу зарыл; алар конвективдик мүчөлөрдүн аппроксимация катасы илээшкектүү мүчөлөрдүн айырмалык көрсөтүүлөрүнөн алда канча аз боло тургандай болушу керек [10]. Физикалык эмес табияттагы осцилляцияларды төмөнкү релаксация [9] же туура эмес чекиттерге жасалма илээшкектүүлүктү киргизүү [12] аркылуу жок кылууга болот. Мында илээшкектүүлүк пайда болгон флуктуацияларды басуу үчүн жетиштүү чоң болушу керек, антпесе алар конвективдик мүчөлөрдүн аракетинин натыйжасында көбөйөт. Бул сандык схеманы диссипативдик жактан туруктуу кылат жана итерациялык эсептөө процессинде экспоненциалдуу өсүп жаткан дүүлүгүлөргө жол бербейт. Бирок, МГД теңдемелерин чыгаруунун бул ыкмасы, негизинен, турбуленттүү илээшкектүүлүккө өтүү менен байланышкан, демек, агымдын мындай параметрлеринде турбуленттүү агым режими ишке ашырылат.

Алынган натыйжалар эксперименталдык изилдөөлөрдүн [13; 14] жана мурда жүргүзүлгөн «куюн-ток функциясы» өзгөрмөлөрүндөгү кысылган электр жаасынын сандык эсептөөлөрүнүн [14; 16] натыйжалары менен тастыкталат.

Корутунду. МГД теңдемелерин эсептөөнүн ар кандай ыкмаларынын негизинде жүргүзүлгөн сандык анализ газдын сарпталышы көбөйгөндө $(I = const)$ жана токтун күчү азайганда $(G = const)$ ламинардык агымдын туруктуулугун жоготууну тастыктайт. Эки модель боюнча алынган бул параметрлердин чектик маанилери бири-бирине жана экспериментке дал келет. Табигый өзгөрмөлөрдү колдонууда сандык МГД модели эксперименттерде агым турбуленттүү болуп калган газ сарпталышы

үчүн конвергенттүү эсептөөнү алууга мүмкүндүк берет. Бирок, буга төмөнкү релаксация параметрин азайтуу аркылуу жетишилет, ал эми ушундай жол менен алынган эсептөө туруксуз болуп саналат. Бул шарттарда агымга киргизилген майда дүүлүгүлөр итеративдик түрдө күчөп, агымдын мүнөздөмөлөрү итерациялык процессте башаламан өзгөрөт, бул акыры айырмалык маселенин конвергенциясына жетүүгө мүмкүндүк бербейт. Дүүлүккөн эсептөөнү мындай жүрүшү ламинардык агым режиминин турбуленттүүгө өтүшү менен байланышкан жана каналдын берилген геометриясы үчүн газдын сарпталышынын ($I = const$ учурунда) жана токтун күчүнүн ($G = const$ учурунда) чектик маанилерин тандоо критерийи катары кызмат кыла алат, бул эксперимент менен тастыкталат.

Колдонулган адабияттар

1. Энгельшт В. С., Гурович В. Ц., Десятков Г. А. и др. Теория столба электрической дуги // Низкотемпературная плазма. Т. 1. – Новосибирск: Наука СО РАН, 1990. – 376 с.
2. Артемов В. И., Левитан Ю. С., Синкевич О. А. Неустойчивости и турбулентность в низкотемпературной плазме. – М.: МЭИ, 1994. – 412 с.
3. Левитан Ю. С. О критических режимах течения в цилиндрическом канале со стабилизированной стенкой дугой // Известия СО АН СССР. Серия технических наук. – 1986. – № 16, вып. 3. – С. 74–80.
4. Usenkanov Dzh., Bakirova N. M. Stabilization the Electric Arc Plasma Flow by Its Own Magnetic Field.
5. Usenkanov Dzh., Bakirova N. M., Bakirova E. M. Simulation of the Interaction of an Electric Arc with a Weld Pool.
6. Токтогонов С. А., Жеенбаев Ж. Ж., Чокоев Э. С., Синкевич О. А. Взаимодействие плазмы дугового разряда с лазерным эрозионным факелом // Генераторы низкотемпературной плазмы: тезисы докладов XI Всесоюзной конференции. – 1989. – С. 71–72.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 6: Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
9. Жуков М. Ф., Коротеев А. С., Урюков Б. А. Прикладная динамика термической плазмы. – Новосибирск: Наука СО РАН, 1975. – 298 с.
10. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
11. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. – М.: Наука, 1984. – 520 с.
12. Должанский Ф. В., Кляцкин В. И., Обухов А. М., Чусов М. А. Нелинейные системы гидродинамического типа. – М.: Наука, 1974.
13. Ивандаев А. И. Об одном способе введения псевдовязкости и его применении к уточнению разностных решений уравнений газодинамики // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1975. – Т. 15, № 2. – С. 523–527.
14. Джумалиев Т. Р., Усенканов Дж. О., Кыдыралиев С. К., Абдразаков А., Асаналиев М. К. Интерферометрические исследования сварочной дуги // Оптические методы исследования потоков: тезисы докладов I Всесоюзного семинара. – Новосибирск, 1989.
15. Zhainakov A., Usenkanov J. O., Jumaliev T. R., Kydyraliev S. K. Study of Electric Arc Plasma Flow in Transition Region from Laminar to Turbulent Current // Plasma Jets in the Development of New Materials Technology: Proceedings of the International Workshop. – Frunze, 1990.
16. Жайнаков А., Усенканов Дж. О. Влияние внешних параметров электродуговых потоков плазмы на переход ламинарного режима течения в турбулентный // Вычислительные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании: материалы Международной конференции. – Новосибирск–Алматы, 2002.

Рецензент: физика-математика илимдеринин доктору, профессор Курбаналиев А.Ы.