

Жайнаков А.

**ИЛИМ ЖАНА БИЛИМ БЕРҮҮДӨГҮ МААЛЫМАТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ ЖАНА
МАТЕМАТИКАЛЫК МОДЕЛДЕШТИРҮҮ**

Жайнаков А.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**

A. Zhaynakov

**INFORMATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELING IN SCIENCE
AND EDUCATION**

УДК: 52.17

Кыргызстандагы компьютердик мектептердин түптөлүш этаптары жана сандык моделдештирүүнүн төмөнкү температурагы плазма аймагында колдонулушу каралган. Магниттик газ динамикасындагы өтө оор маселелерди чечүүдөгү заманбап эсептөө технологияларынын жана жаңы компьютердик технологияларынын маанислүү орду белгиленип көрсөтүлгөн.

Негизги сөздөр: *төмөнкү температурадагы плазма, магниттик газ динамикасы, сандык моделдөө, компьютердик эксперимент.*

Рассмотрены основные этапы становления вычислительной школы Кыргызстана в области численного моделирования в физике низкотемпературной плазмы. Подчеркивается важная роль современных вычислительных средств и новых компьютерных технологий в решении ресурсоемких задач магнитной газовой динамики.

Ключевые слова: *низкотемпературная плазма, магнитная газовая динамика, численное моделирование, компьютерный эксперимент.*

Considered the main stages of the computing scale of Kyrgyzstan in the field of numerical simulation of low-temperature plasma physics. Highlights the important role of modern computational tools and new computer technologies in solving demanding tasks magnetic gas dynamics.

Key words: *low-temperature plasma, magnetic gas dynamics, numerical modeling, computer experiment.*

Сейчас информационные технологии и математическое моделирование являются эффективным инструментом исследования в различных отраслях науки. Необходимость применять вычислительную технику и математические методы, привело к идее создания вычислительных центров по всей стране. В 1976 году под моим руководством был создан Республиканский межвузовский вычислительный центр (впоследствии Институт информатики и информационных технологий), который стал основой компьютеризации системы образования и науки Республики. Примечательно, что в институте впервые в Республике в 1978-1980гг. были организованы курсы по обучению компьютерной грамотности учителей школ, преподавателей высших учебных заведений и других специалистов системы образования.

При институте был создан отдел численных методов решения прикладных задач. В этом отделе

сотрудниками проводилась большая научно-исследовательская работа по изучению физических процессов, протекающих в электрической дуге, развивались методы численного анализа поведения и свойств электродуговой плазмы с помощью ЭВМ. Впоследствии многими сотрудниками этого отдела были защищены кандидатские и докторские диссертации.

Развитие численных методов решения дифференциальных уравнений и новых компьютерных технологий подняли методы вычислительного эксперимента на качественно новый уровень. Знание компьютерных технологий, умение пользоваться современными системными и прикладными компьютерными программами стало жизненно необходимым компонентом в вузовском образовании, возникла необходимость подготовки специалистов владеющих современными компьютерными технологиями.

В настоящее время методы математического моделирования и информационные технологии определяют в целом состояние фундаментальных исследований в мире, стране и отдельном регионе. В настоящее время трудно представить исследователя в любой области знаний, который бы не использовал возможности вычислительной техники и математического моделирования.

Автор статьи является одним из основоположников нового научного направления в Кыргызстане – исследование в области теплофизики и теории тепло и массообмена высокотемпературных процессов на основе численного моделирования и вычислительного эксперимента. Под его руководством построена модель расчета плазматрона на основе системы магнитогидродинамических уравнений в приближении пограничного слоя с учетом собственного магнитного поля электрической дуги; разработаны теоретические модели для анализа протяженных и коротких электрических дуг в канале и со свободной границей, основанные на численном решении полной системы магнитогазодинамических уравнений.

В настоящее время наибольшее распространение и применение получили электродуговые генераторы плазмы – электродуговые плазматроны. Электрическая дуга горит в канале, по которой в

аксиальном направлении течет газ. Нагретый газ выходит из канала в виде струи плазмы.

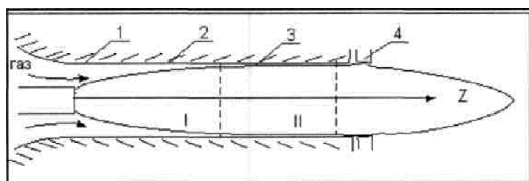


Рис.1. Схема электродугового плазматрона постоянного тока с фиксированной длиной дуги, стабилизированной вихревым потоком плазмообразующего газа: 1, 4-электроды дуги; 2 -труба; 3- дуга; I - область впуска, II - полностью развитое течение.

Здесь расчет плазматрона проводится в приближении уравнений типа пограничного слоя. В рассматриваемой модели учтено собственное магнитное поле электрической дуги, которое может оказывать большое влияние на ускорение газа в электрической дуге.

Независимо от конкретной конструкции генераторов плазменного потока (плазматронов) в большинстве из них газ движется в трубе, поперечные размеры которой много меньше продольного размера. Ток, протекающий между электродами, разогревает плазму, часть энергии идет на увеличение скорости потока, а часть вследствие теплопроводности и излучение передается стенкам плазматрона. Давление газа на входе разгонного участка порядка атмосферного (или больше), так что время установления локального термодинамического равновесия много меньше характерного гидродинамического времени. Предполагается также выполнение условия квазинейтральности.

Согласно сказанному выше движение газа внутри плазматрона может быть описано уравнениями магнитной газодинамики с учетом вязкости, тепло- и электропроводности газа.

Рассматриваемая система состоит из уравнений Навье-Стокса

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{\Delta P}{\rho} + \vec{F}_M + \vec{F}_E, \quad (1)$$

здесь \vec{v} - массовая скорость газа, P - давление ρ - плотность, \vec{F}_M -Лоренцева сила.

$$\vec{F}_M = \frac{1}{c} [j\vec{H}] \quad (2)$$

В выражении для вязких сил следует учитывать зависимость коэффициента вязкости μ от температуры T , поскольку при имеющихся в плазматроне температурных градиентах эта зависимость становится существенной.

Уравнение движения следует дополнить уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0, \quad (3)$$

и уравнение переноса тепла. Причем, при записи уравнения количество тепла, отнесенное к

единице объема, выделяющееся в 1 сек в элементе газа равно σE^2 , здесь σ - проводимость плазмы. Тепловыделение, обусловленное тензором вязких напряжений, будем считать пренебрежимо малым. Выражения для определения \vec{H} и \vec{E} получают из уравнения Максвелла, где пренебрегают током смещения, и законом Ома: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$.

Принятые выше допущения, связанные с особенностями движения газа в плазматроне приводят к существенному упрощению системы МГД уравнений. Рассматривается стационарное течение в полубесконечной трубе, обладающего аксиальной симметрией, при этом отсутствует внешнее магнитное поле и поток импульса в азимутальном направлении, таким образом, собственное магнитное поле имеет только компоненту H_ϕ . Напряженность электрического поля имеет отличные от нуля компоненты E_z и E_r .

Поведение электрической дуги, горящей в трубе с ламинарным потоком газа при достаточно больших числах Рейнольдса, числа Маха $M \ll 1$ и радиальной компоненты скорости малой в сравнении с аксиальной, это очевидно из условия, что диаметр трубы $d \ll l$ характерного продольного размера, может быть описано следующей системой уравнений.

Уравнения энергии (перенос тепла):

$$\sigma E^2 = \rho C_p \left(v \frac{\partial T}{\partial z} + u \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \gamma \frac{\partial T}{\partial r} + \Phi \quad (4)$$

Уравнения движения:

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + F = \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial z} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r u \frac{\partial u}{\partial r} \quad (5)$$

Второе уравнение движения в приближении пограничного слоя дает равенство

$$\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial P'}{\partial r} = 0$$

Это уравнение может служить для вычисления поправки $P'(r, z)$ к давлению $P(z)$, которое в используемом приближении не зависит от r .

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v) = 0 \quad (6)$$

Закон Ома

$$I = 2\pi E \int_0^R \sigma r dr \quad (7)$$

Запись уравнений аналогично [1], но в уравнение движения введена сила F , обусловленная магнитным полем электрической дуги. Величина F приравнивается аксиальному градиенту магнитного давления в пренебрежении радиальной компонентой плотности электрического тока:

$$F = -\frac{\partial P'}{\partial z} \quad (8)$$

Величина магнитного давления P' может быть легко найдена в случае пренебрежимо малой

плотности тока j_r в радиальном направлении по сравнению с полностью тока j_z

При этом из уравнений Максвелла следует

$$j_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\varphi)$$

откуда

$$H_\varphi = \frac{1}{r} \int_0^r j_z r dr \quad (9)$$

Градиент магнитного давления в радиальном направлении равен

$$\frac{\partial P'}{\partial r} = \varepsilon_0 j_z H_\varphi \quad (10)$$

Подставляя сюда H_φ из (9) и интегрируя от R до r, получим

$$P'(r, z) = \varepsilon_0 \int_R^r \frac{j_z}{\xi'} \left(\int_0^{\xi'} j_z t dt \right) d\xi' \quad (11)$$

Используя закон Ома $j_z = \sigma E_z$ и, полагая в дальнейшем $E_r = 0$, $E_z = E$ - постоянная по сечению трубы найдем

$$P'(r, z) = \varepsilon_0 E^2 \int_R^r \frac{\sigma}{\xi'} \left(\int_0^{\xi'} \sigma t dt \right) d\xi' \quad (12)$$

Реальные свойства газа при решении (ρ , C_p , σ , λ , μ , ψ) полагаются известными функциями температуры и давления.

При решении считаются заданными следующие величины: I - полная сила тока, G- расход газа, G- расход газа, R- радиус трубы, r_0 - радиус электрода. Решение полученных уравнений ищется при граничных условиях:

$$z=0 \quad r_0 \leq r \leq R, \quad u=u_0, \quad v=0, \quad T=T_0, \quad P=P_0$$

$$z=0 \quad 0 \leq r \leq r_0, \quad u=0, \quad v=0, \quad T=T(r,0), \quad E=E_0, \\ P = P_0, \quad P' = P'(r,0) \quad (13)$$

$$z \geq 0 \quad r = R, \quad u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_{CT}$$

$$z \geq 0 \quad r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad v = 0$$

Значения величин $T(r,0)$, E_0 , $P'(r,0)$ находятся из расчета цилиндрической дуги радиуса r_0 . При решении задачи вместо условия равенства нулю v на оси было использовано условие постоянства расхода массы

$$G = 2\pi \int_0^R \rho u r dr \quad (14)$$

Это соотношение получается почленным интегрированием по радиусу уравнения (6). Уравнения (4-7), (12), (14) и граничные условия (13) записываются в безразмерном виде. Для удобства счета в уравнении вместо координаты r введена координата $\eta = \ln(1 + \Delta - \bar{r})$. Это дает возможность,

задавая различные Δ , растягивать пристеночную область, где велики градиенты искомых величин по радиусу. Тогда система уравнений и граничные условия записывается в новых координатах η . Для нахождения входных условий произведен расчет распределения температуры и характеристик цилиндрически симметричной дуги в аргоне.

Из решения уравнения для цилиндрической дуги находятся входные значения температуры, напряженности электрического поля и распределение магнитного давления, которые применяются для расчета плазматрона в качестве входных условий.

Дифференциальные уравнения аппроксимируются в конечных разностях по неявной двухслойной схеме. Где вторые производные в дивергентном виде представлено по схеме Г.И. Марчука [2], первые производные заменены несимметричными разностями, чем обеспечено корректность метода прогонки при решении разностных уравнений. Все области разбиваются равномерной сеткой шагом h по координате η и с шагом l по координате \bar{z} . Разностным уравнениям присоединяются уравнения, в которых интегралы заменены суммами по формуле трапеции. Таким образом, получается система уравнений, решая которую совместно граничными условиями определяем искомые величины.

Программа вычислений по вычисленному алгоритму было реализовано на языке программирования Fortran. Ниже рассмотрены некоторые результаты расчета области впуска плазматрона с параметрами.

радиус канала плазматрона $R=1,25$ мм; радиус электрода $r_0=1$; ток дуги $I=65$ А; плазмообразующий газ – аргон, расход $G=0,25$ г/с; давление $P_0=1$ атм.; температура стенки $T_{CT}=300$ °К; входной профиль скорости ступенчатый. При расчете шаг по z , $l = 0,001$.

Реальные свойства аргона электропроводность, теплопроводность, излучательная способность взяты из работы [3], вязкость из [4] плотность из [5], удельная теплоемкость при постоянном давлении и энтальпия из [6] и задавались в виде таблиц. На рис.2. дано поле температур, на рис.3. профили аксиальной и массовой ρu скоростей в сечениях трубы на различном расстоянии z от поверхности внутреннего электрода. Характерным для течения газа являются большие значения аксиальной скорости, и лишь постепенное заполнение всего сечения трубы текущим газом. Из результатов расчета радиального потока массы следует, что поток массы в начальных сечениях стремится к оси столба дуги, а затем постепенное от оси к стенке трубы.

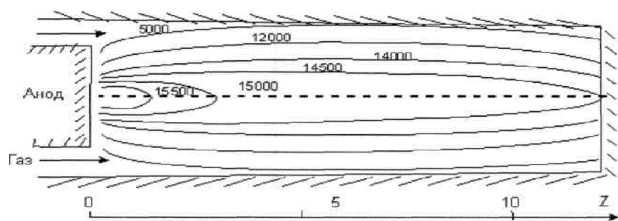


Рис.2. Поле температур в области впуска плазматрона

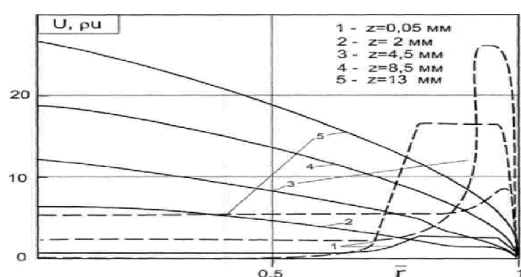


Рис.3. Профили аксиальной скорости u ($\times 10^{-2}$ м/с) и массовой скорости ρu ($\text{г}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{сек}^{-1}$, пунктир) в сечениях трубы на расстоянии z от внутреннего электрода

На рис.4 а) и б) представлены радиальные распределения температур и магнитного давления в сечениях на различном расстоянии от поверхности электрода. Из рис. 4 видно, что значение температуры на оси дуги уменьшается с удалением от поверхности внутреннего электрода, а участок профиля в районе температур до 5000 К расширяется из рис.5. видно, что значение магнитного давления на оси дуги уменьшается с удалением от поверхности внутреннего электрода.

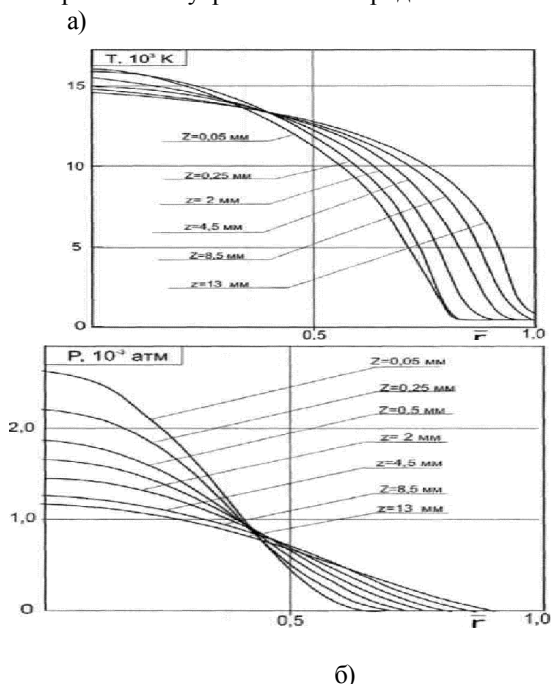


Рис.4. а) Радиальное распределение температуры для сечений б) радиальное распределение магнитное давление на различном расстоянии z от поверхности электрода.

Полные потери мощности дуги складываются из потерь на излучение и потерь тепла, отдаваемого стенками за счет теплопроводности. Расчет показывает, что примерно 20-25% полной мощности идет на потери за счет излучения, кондуктивный поток тепла на стенку значительно меньше.

Потенциал электрического поля линейно изменяется вдоль дуги, напряженность электрического поля убывает.

Статическое давление на входе в сопло плазматрона равно 1,8 атм. и плавно уменьшается к выходу из сопла до атмосферного давления. Вид температурного поля дуги и характер изменения среднemasовых температуры и скорости вдоль сопла плазматрона и другие параметры показывают, что разгонный участок плазматрона и другие параметры показывают, что разгонный участок плазматрона имеет протяженность ~ 13 мм. Далее устанавливается полностью развитое течение с постоянной температурой плазмы.

Таблица 1.

Z (мм)	0,1	0,25	0,5	1-13
$U_m(0)/U(0)$	1,8	1,2	1,05	1

В таблице 1 приведено отношение скорости течения газа на оси с учетом магнитных сил $U_m(0)$ к скорости без учета магнитных сил $U(0)$ для различных расстояний z от внутреннего электрода.

Магнитное поле электрической дуги приводит к повышению аксиальной скорости на оси дуги. Это характерно особенно для начала области впуска плазматрона.

Как видно из расчетов при общем токе до 100А влияние магнитного поля на величину аксиальной скорости на оси дуги не превышает 10-15%.

Научной школой под моим руководством разработаны теоретические модели для расчета характеристик электрических дуг с учетом состояния анодного узла, которые успешно используются в сварочных технологиях. Результаты исследования использованы в плазменных технологиях при создании новых конструкций плазматронов и определении их оптимальных режимов работы не только в нашей стране, но и в таких известных научных центрах, как Институт электросварки им. Е.О.Патона (Украина), для оптимизации режимов сварки, разработанная им полуаналитическая двумерная модель электрической дуги использованы МВТУ им. Н.Э.Баумана (Москва) для разработки теории приэлектродных процессов учетом влияния на них столба дуги. В настоящее время являюсь руководителем проекта научно-исследовательских работ «Прикладная динамика электродуговой плазмы» Института физико-технических проблем и материаловедения. Использование новых компьютерных технологий выполняемых в работах, позволяет поднять уровень этих исследований и глубже понять многие закономерности физических процессов в электрической дуге. Результаты

исследований с успехом применяются в сварочных технологиях. Разработана система компьютерного моделирования процессов теплообмена при плазменной резке металлов для реализации вычислительного эксперимента и выполнения исследований. По результатам конкурса в 2013 году серия издания книг «Информатика базовой курс» и монография «Компьютерное моделирование процессов обработки металлов высококонцентрированными потоками энергии», авторами которых являются Жайнаков А., Кабаева Г.Дж. удостоена премия им. И. Ахунбаева за значительный вклад в развитие и популяризацию науки.

Перспективы развития применения информационных технологий и математическое моделирование связаны с дальнейшим развитием направления исследований в области теплофизики и теории

тепло-массообмена высокотемпературных процессов, а также и других областей на основе математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Литература:

1. В.Н. Ветлуцкий, В.Г. Севастьяненко ПМТФ, №5, 82, 1968, №1, 136, 1969.
2. Г.И. Марчук Методы расчета ядерных реакторов. Госфтомиздат, 1961.
3. J. Bues, h.J. Patt, J. Richter. Z. angew. Physik, 22, №4, 345, 1967.
4. И. Кимура, А. Канзава. Ракетная техника и космонавтика. №3, 120, 1965.
5. K.S. Drellishak. Phys. Fluids, 6, №9, 1280, 1963.
6. E. Baum, G. Cann, Thermodynamic properties of argon, Electro-Optical Systems, INC, Pasadena, Calif., 1963.

Рецензент: д.т.н., профессор Татыбеков А.Т.