УДК 621.387.143

д.т.н. Дзюба В.Л.,
к.ф .-м.н. Калюжный Г.С., к.т.н. Корсунов К.А.
(ВНУ им. В. Даля, г. Луганск, Украина),
к.т.н. Сергиенко С.Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

Наведено результати чисельного розрахунку параметрів плазмового струменя, отримано аксіальні та радіальні розподіли температури та швидкості, які можуть бути використані при розв'язанні задачі підвищення ефективності плазмових технологій.

Ключові слова: *плазмовий струмень, температура, швидкість, плазмотрон.*

Приведены результаты численного расчета параметров плазменной струи, получены аксиальные и радиальные распределения температуры и скорости в струе, которые могут быть использованы при решении проблемы повышения эффективности плазменных технологий.

Ключевые слова: *плазменная струя, температура, скорость, плазмотрон.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Плазменные струи, применяемые в процессах обработки материалов, характеризуются высокими энергетическими и газодинамическими параметрами, при этом плазменная струя может оказывать на обрабатываемый материал не только тепловое, но и динамическое воздействие, обусловленное скоростным напором струи, а также химическое воздействие, зависящее от состава плазмообразующего газа. В конкретных технологических процессах определяющим может быть одно из этих воздействий, а в некоторых случаях два или все виды воздействия. Поэтому определение тепловых и газодинамических характеристик плазменных струй, их зависимость от геометрических и энергетических параметров плазмотрона с целью повышения эффективности плазменных технологий по-прежнему остается актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций.

Анализ известных работ [1-4 и др.] показывает, что в настоящее время большое внимание уделяется вопросам повышения эффективности плазменных технологий и их дальнейшему совершенствованию, что

требует проведения объемных теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические расчеты параметров плазменных струй выполняются, как правило, с привлечением численных методов. Однако некоторые вопросы, такие, как влияние загрузки порошка на температуру и скорость плазменной струи, торможение плазменного потока на обрабатываемой поверхности и ряд других, исследованы не достаточно полно, что и обусловливает проведение дальнейших исследований.

В данной работе ставится задача численного расчета распределений температуры и скорости воздушной плазменной струи.

В линейных электродуговых плазмотронах, наиболее часто используемых в различных технологических процессах, плазменная струя имеет цилиндрическую симметрию (рисунок 1), а распределения температуры, аксиальной скорости газового потока и других параметров по радиусу и длине струи характеризуются крайней неравномерностью. Поскольку для отладки технологических процессов необходимо знать зависимость основных параметров генерируемой в плазмотроне плазменной струи от режима работы плазмотрона (силы тока дуги, рода и расхода газа, геометрии выходного электрода (сопла) и др.), то значительный интерес и актуальность приобретает разработка компьютерных моделей процесса генерации плазменной струи.

Разработка компьютерной модели процесса генерации воздушной плазменной струи включала в себя создание математической модели для численного расчета параметров струи и разработку пакета прикладных программ для реализации численных методов решения. В основе математической модели лежит система магнитогазодинамических (МГД) уравнений, описывающих течение электродуговой плазмы при следующих допущениях:

- рассматриваемая плазменная система обладает цилиндрической симметрией, а протекающие процессы являются стационарными;
- плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия, излучение плазмы – объемное, а плазма считается оптически тонкой;
- работой сил давления и вязкой диссипацией можно пренебречь, а основным механизмом переноса энергии считается теплопроводность (естественная конвекция в расчет не принимается);
- течение плазмы вязкое дозвуковое, внешние магнитные поля отсутствуют.

С учетом указанных допущений система уравнений, описывающих плазменную струю, имеет вид [1-3]:

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

$$\rho u\frac{\partial u}{\partial z}+\rho v\frac{\partial u}{\partial r}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\mu\frac{\partial u}{\partial r}\right), \tag{2}$$

$$\rho C_p\left(v\frac{\partial T}{\partial r}+u\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\chi\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\chi\frac{\partial T}{\partial z}\right)-W\,. \tag{3}$$

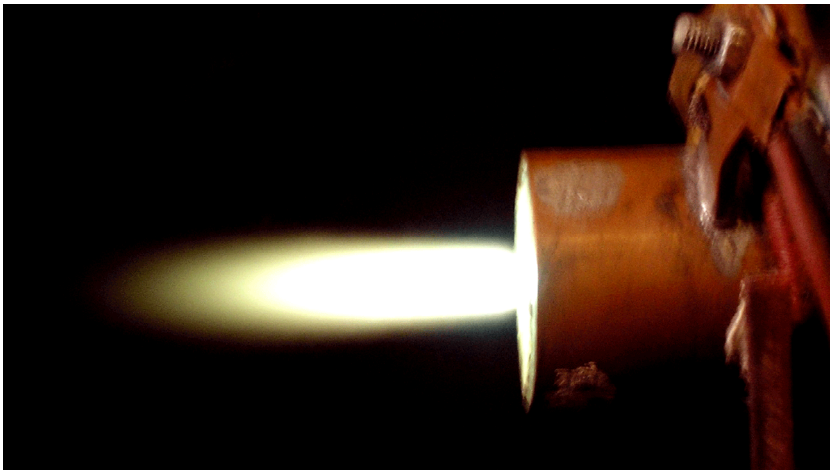


Рисунок 1 - Фотография воздушной плазменной струи, генерируемой плазмотроном: I = 220 А, G =1,1 г/с, d = 5 мм

Система уравнений (1)-(3) дополняется граничными условиями. Начало отсчета координат совместим со срезом сопла на оси канала плазмотрона. Из условия сохранения полного расхода газа через плазмотрон имеет место равенство (при z=0):

$$G=2\pi\int_0^R \rho u r dr\ , \tag{4}$$

где R - радиус разрядного канала плазмотрона.

Для профиля аксиальной скорости в начальном сечении (z=0) будем использовать формулу Шлихтинга [2,4,5]:

$$\frac{u}{u_m}=\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^{1,5}\right]^2\ , \tag{5}$$

где u_m - значение скорости на оси струи.

Профиль температуры на срезе $T = T(0,r)$ сопла можно получить как из аналитических зависимостей, приведенных, например, в [6], так и используя иные зависимости или экспериментальные данные.

На оси струи (при r=0) граничные условия имеют вид

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \ , \ \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \ , \ v = 0 \ . \qquad (6)$$

В качестве граничных условий внешней области плазменной струи принимаются условия «гладкого сопряжения» струи с окружающей средой, т.е. при $r = R_c$ имеем

$$T = T_\infty \ , \ u = 0 \ . \qquad (7)$$

Величина радиуса струи R_c выбирается такой, чтобы при $r = R_c$ и любом значении z

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \delta_1 \ \text{ и } \ \frac{\partial u}{\partial r} = \delta_2 \ , \qquad (8)$$

где δ - некая малая величина.

Корме того, при определении теплового и динамического радиусов струи нами были использованы интегральные соотношения [2]:

$$\int_0^{Rc1} \rho u C_p (T - T_\infty) r dr = const \ , \qquad \int_0^{Rc2} \rho u^2 r dr = const \ . \qquad (9)$$

Систему уравнений (1)-(9) необходимо дополнить зависимостями молекулярных коэффициентов переноса, теплофизических параметров и радиационных потерь плазмообразующего газа (воздуха) от температуры и давления:

$$\rho = \rho(T,p); \ \ C_p = C_p(T,p); \ \ \chi = \chi(T,P); \ \ \mu = \mu(T,p); \ \ W = W(T,p) \ , \qquad (10)$$

которые были взяты из [1].

Данная система уравнений решалась численно с учетом рекомендаций, приведенных в [8,9]. В данной работе принимались следующие исходные данные: диаметр канала плазмотрона - $5 \cdot 10^{-3}$ м; расход газа – 10^{-3} кг/с; сила тока – 250 А.

Профиль температуры плазмы на срезе сопла $T = T(0, r)$ задавался в виде [4]:

$$\frac{T - T_\infty}{T_m - T_\infty} = \left(\frac{u}{u_m}\right)^{Pr_T}, \qquad (11)$$

где T_∞ - температура окружающей среды (в расчетах T_∞ принималась равной 300 К), Pr_T - турбулентное число Прандтля, которое для осесимметричных струй равно Pr_T = 0,8. Для нахождения значения T_m на оси струи на срезе сопла в зависимости от силы тока, расхода газа и диаметра канала (сопла) применялась обобщенная зависимость [7]:

$$T_m = 0{,}363 d^{-0{,}706}\left(\frac{G}{d}\right)^{0{,}794}\left(\frac{I^2}{Gd}\right)^{0{,}256} + 5600, \qquad (12)$$

которая справедлива в диапазоне параметров d = 3,5-25,4 мм; L/d = 4-10; G = 0,375 – 21 г/с; N = 3-400 кВт с погрешностью до 6%.

На рисунке 2 приведены рассчитанные распределения осевых значений температуры и скорости плазмы по длине воздушной струи, а на рисунке 3 – радиальные профили температуры и скорости плазмы на различных расстояниях от среза сопла плазмотрона.

Если условно считать эффективной длиной плазменной струи расстояние, на котором температура струи уменьшается до 1000 К, то в этом случае расчет эффективной длины струи дает величину порядка 7,5 см.

В инженерной практике плазменную струю часто характеризуют среднемассовой температурой и скоростью истечения плазмы на срезе сопла плазмотрона. Среднемассовая скорость вычислялась по формуле [5]:

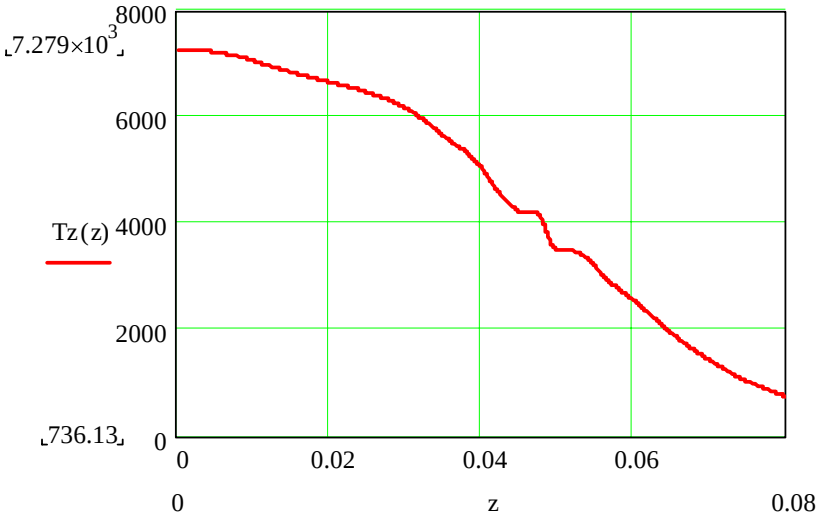
$$u_{sm} = \frac{\int_0^R \rho u r dr}{\int_0^R \rho r dr}, \qquad (13)$$

и для полученных расчетных данных составила u_{sm} =151,06 м/с.

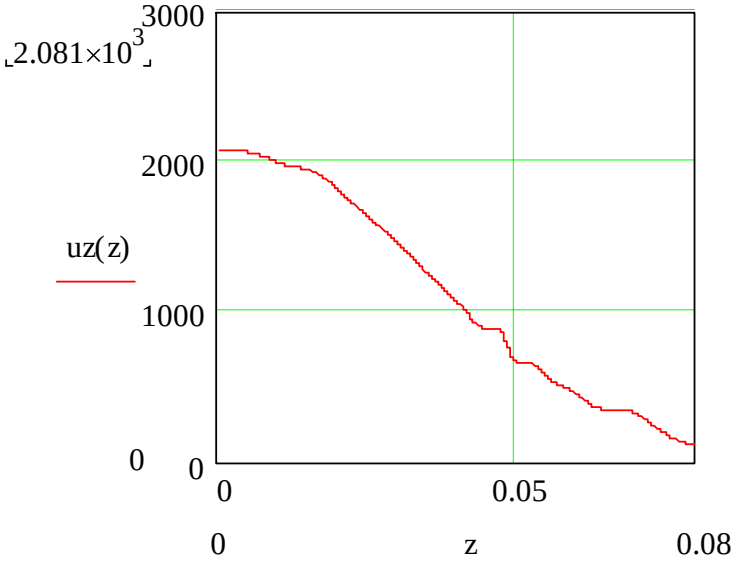
Среднемассовое значение температуры на срезе сопла определялось следующим образом [6]:

$$T_{sm} = \frac{2\pi}{G}\int_0^R \rho u T r dr, \qquad (14)$$

и составило T_{sm} =2933 К.

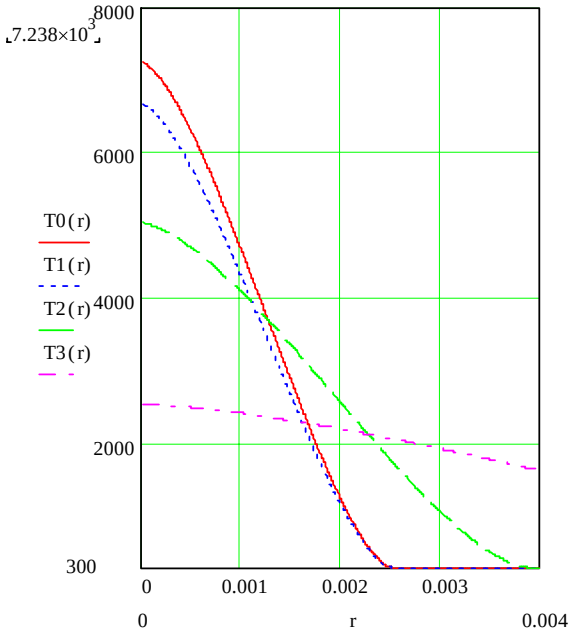


а

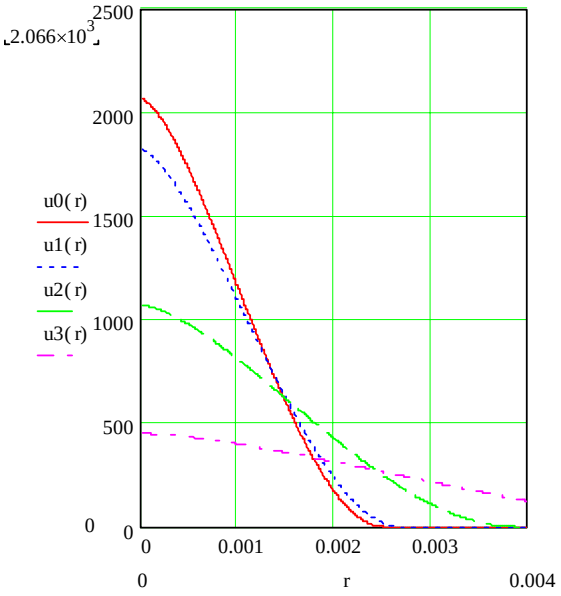


б

Рисунок 2 - Распределения осевых значений температуры (а) и аксиальной скорости (б) плазмы по длине воздушной струи



а



б

Рисунок 3 - Радиальные профили температуры (а) и скорости (б) плазмы в различных сечениях струи (z = 0; 0,02; 0,04; 0,06 м)

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученные распределения температуры и скорости в плазменной струе могут быть использованы в процессе отладки плазменных технологий. В дальнейшем необходимо провести исследования по влиянию на скорость и температуру плазменной струи загрузки порошком и торможения плазменного потока на обрабатываемой поверхности.

Принятые обозначения: T – температура (К); u – осевая составляющая скорости (м/с); v – радиальная составляющая скорости (м/с); L, d, R – длина, диаметр и радиус разрядного канала плазмотрона (м); G – расход газа (кг/с).

Библиографический список

1. Теория столба электрической дуги / В.С. Энгельшт, В.Ц. Гурович, Г.А. Десятков и др. – Новосибирск: Наука, 1990. – 376 с. – (Низкотемпературная плазма. Т. 17).

2. Донской А.В. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / А.В. Донской, В.С. Клубникин. – Л.: Машиностроение, 1979. – 221 с.

3. Компьютерное моделирование процесса плазменного напыления / И.В Кривцун, Ю.С. Борисов, А.Ф. Мужиченко и др. // Автоматическая сварка. – 2000. - № 12. – С. 42-51.

4. Петров С.В. Плазменное газовоздушное напыление / С.В. Петров, И.Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1993. – 495 с.

5. Белянин Н.М. Турбулентная модель дуги постоянного тока / Н.М. Белянин // Моделирование и методы расчета физико-химических процессов в низкотемпературной плазме. – М.: Наука, 1974. – С.107-120.

6. Даутов Г.Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г.Ю. Даутов, В.Л. Дзюба, И.Н. Карп. – К.: Наук. думка, 1984. – 168 с.

7. Сергеев В.Л. Обобщение температурных характеристик плазменной струи линейного плазмотрона / В.Л. Сергеев, Е.В. Гаркавый // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т.55, № 3. – С. 383-389.

8. Математическое моделирование электрической дуги / В.С.Энгельшт, Д.С. Асанов, В.Ц. Гурович и др. – Фрунзе: Илим, 1983. – 363 с.

9. Дресвин С.В. Основы математического моделирования плазмотронов: в 3-х частях / С.В. Дресвин, Д.В. Иванов. – СПб, Изд-во Политех. ун-та, 2004.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблодским Н.Н.