

03;04

## Влияние диафрагмы на вихревую термоизоляцию дуги в канале

© В.М. Лелевкин, В.Ф. Семенов

Кыргызско-российский славянский университет, Бишкек  
E-mail: aral@krsu.edu.kg

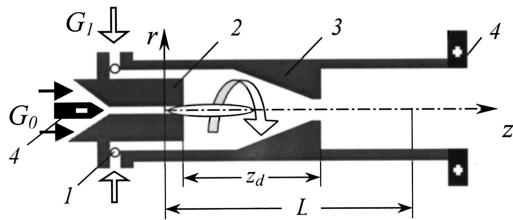
Поступило в Редакцию 14 января 2002 г.  
В окончательной редакции 18 марта 2002 г.

На основе равновесной магнитогазодинамической модели проведен расчет течения и нагрева газа (аргона) в диафрагмированном канале плазмотрона в зависимости от положения и размеров диафрагмы, расхода и интенсивности закрутки газа. Установлены особенности изменения характеристик дуги в каналах переменного сечения для закрученных и незакрученных потоков.

Большую роль в формировании требуемых характеристик потока в канале плазмотрона играет газодинамическая картина течения, например при стабилизации дуги и термоизоляции ее от стенок канала применяются пористый вдув, аксиальные потоки или закрутка газа [1,2]. Для получения необходимой картины течения в канале плазмотрона делаются различные полости, уступы, диафрагмы, межэлектродные вставки [1–4].

Цель данной работы — на основе решения уравнений магнитной газовой динамики (МГД) установить влияние диафрагмы и закрутки газа на термоизоляцию дуги в канале плазмотрона (рис. 1).

Предполагается, что протекающие процессы стационарны, течение ламинарное и осесимметричное, излучение объемное, плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия [5]. Решение МГД уравнений [5,6] проводится конечно-разностным методом в физических переменных с использованием процедуры SIMPLE [7]. Дискретизация дифференциальных уравнений осуществляется на неравномерной сетке ( $31 \times 151$ ) методом контрольного объема, обеспечивающего законы сохранения массы, импульса и энергии на любой группе контрольных объемов [7]. Рассчитывается поток плазмы, вытекающий из катодного насадка с расходом  $G_0 = 0.01$  g/s, внутренним радиусом  $R_0 = 2.5$  mm и толщиной стенок 10 mm в канал плазмотрона диаметром  $2R = 30$  mm, в котором полный расход  $G = G_0 + G_1 = 1, 3, 6$  g/s,

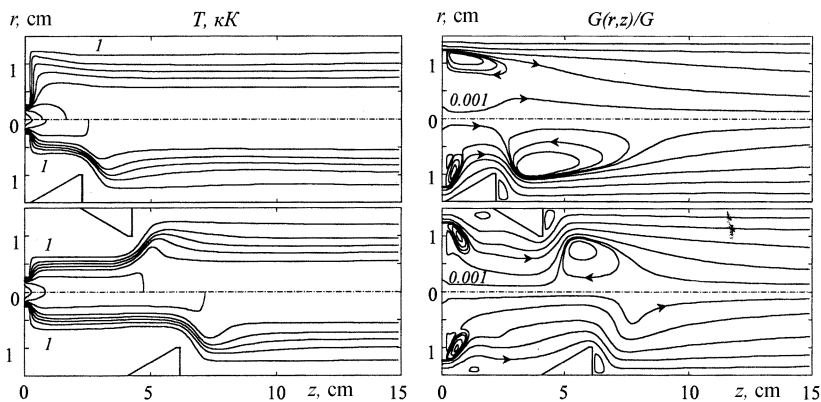


**Рис. 1.** Схема плазмотрона с дифрагмированным каналом: 1 — закручивающее устройство, 2 — катодный насадок, 3 — конфузурная диафрагма, 4 — электроды,  $L$  — расчетная область.

момент закрутки газа  $M \sim G_1$  [6], температура стенок 300 К, сила тока  $I = 100$  А, протяженность конфузурной диафрагмы 2 см, радиус ее отверстия  $R_d = 5$  и 10 мм и расположение в канале  $z_d = 2, 4, 6, \dots, 14$  см.

Как следует из результатов (рис. 2, 3), в дифрагмированном канале с увеличением момента закрутки газа происходит качественное изменение в распределении характеристик потока. На участке до диафрагмы реализуется четкая граница между плазменной струей и внешним вихревым потоком газа, что свидетельствует об их слабом тепло- и массообмене (рис. 2). В этой области нагрев стенок канала определяется излучением. Максимальное расстояние  $z_d$ , на котором сохраняется практически цилиндрическая форма столба дуги, не превышает 5–10 калибров отверстия диафрагмы ( $z_d < 10R_d$  при  $R/R_d = 1.5$  и  $z_d < 20R_d$  при  $R/R_d = 3$ ). При отсутствии диафрагмы или при ее смещении на расстояние  $z_d = 14$  см заметно снижается влияние закрутки газа на локализацию дуги в приосевой области, а распределение характеристик происходит как в незакрученном потоке.

Наличие катодного насадка в канале приводит к образованию за его торцом рециркуляционной зоны, протяженность которой зависит от расхода и момента закрутки газа. При отсутствии закрутки с увеличением расхода газа зона рециркуляции расширяется и вовлекает в вихревое движение плазму из приосевой области. Образование вблизи оси возвратных течений увеличивает тепло- и массообмен между плазменной струей и спутным потоком газа, приводит к немонотонному изменению параметров плазмы в радиальном и аксиальном направлениях (рис. 3),

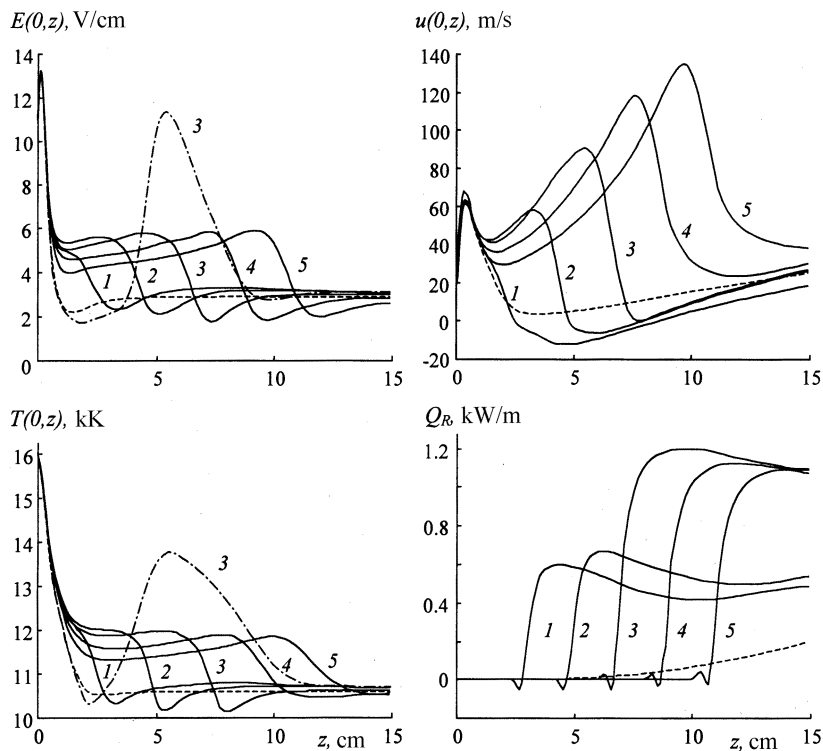


**Рис. 2.** Влияние расположения диафрагмы на поле изотерм с шагом 2 кК и линий тока газа  $G(r, z)/G = \pm 0.001, 0.01, 0.05, 0.2, 0.6, 1.2$ ;  $R_d = 10$  мм,  $I = 100$  А,  $G = 6$  г/с,  $M \neq 0$ .

быстрому расширению тепловой границы дуги непосредственно от среза сопла насадка.

С учетом закрутки газа на участке до диафрагмы приосевые возвратные течения не образуются (рис. 2). Зона рециркуляции формируется только вблизи внешней кромки торца насадка и, по сравнению с незакрученным потоком, имеет значительно меньшую протяженность. Закрутка газа увеличивает градиент давления в направлении стенок канала, и плазменная струя локализуется в приосевой области. Это заметно проявляется с увеличением момента закрутки и степени диафрагмирования канала  $R/R_d$ . На периферии дуги образуется подобие цилиндрической поверхности с малой радиальной скоростью, что указывает на незначительный тепло- и массообмен между приосевым течением и основным потоком.

В потоке выделяются две области: внешняя, где тангенциальная скорость  $w$  соответствует закону квазипотенциального течения ( $w \sim 1/r$ ) и внутренняя — с вращением по закону твердого тела ( $w \sim r$ ), что подтверждается экспериментами [3]. Максимум  $w$  лежит вблизи токопроводящей границы и смещается к оси с увеличением расхода газа и степени диафрагмирования канала. Вытекающий из насадка незакрученный поток плазмы вовлекается в квазитвердое вращение на расстояниях



**Рис. 3.** Аксиальные распределения напряженности электрического поля, осевой скорости, температуры и кондуктивного потока тепла на стенке в зависимости от положения диафрагмы:  $z_d = 2$  (1), 4 (2), 6 (3), 8 (4), 10 (5) см; пунктир — без диафрагмы, штрихпунктир — без учета закрутки;  $R_d = 10$  мм,  $G = 6$  г/с,  $I = 100$  А.

$z/R_0 > 1$  от среза сопла насадка. Увеличение  $R/R_d = 1.5 \div 3$  ведет к росту скорости вращения потока и поджатию дуги к оси канала. Отсутствие диафрагмы заметно снижает радиальный градиент давления и величину  $w$ , что соответствует незакрученному течению. Поэтому для локализации дуги в приосевой области и ее термоизоляции от стенок необходимо наряду с закруткой газа диафрагмировать канал и располагать диафрагму на определенном расстоянии от начального

сечения  $z_d$ . Полученный результат согласуется с экспериментальными данными по вихревым задиафрагмированным камерам [2] и подтверждает существенную зависимость диаметра устойчивой поверхности дугового потока плазмы от размеров выходного сечения диафрагмы.

В области расположения конфузурной диафрагмы дуга сужается, возрастают скорость, плотность тока и напряженность электрического поля. Для незакрученного потока эти изменения более значительны (рис. 3). Основная масса газа протекает вдоль поверхности конфузора, а наличие радиального конвективного потока в направлении к оси способствует возвращению тепла, переносимого теплопроводностью обратно в ствол дуги, и защите стенок от теплового воздействия. Подобная картина наблюдается при вдуве газа через пористые стенки канала.

На участке за диафрагмой рециркуляционные зоны в пристеночной области реализуются как в закрученных, так и в незакрученных потоках. В закрученных потоках наряду с пристеночной образуется приосевая зона рециркуляции (рис. 2), размеры которой возрастают с увеличением момента закрутки. Если на участке до диафрагмы закрутка газа подавляет образование приосевых возвратных течений, то за диафрагмой — способствует их формированию, т.е. эффекта вихревой термоизоляции дуги не наблюдается. При смещении диафрагмы в глубь канала за счет быстрого нарастания осевой скорости (рис. 3,  $w_{\max} \sim 50 \text{ m/s}$ ) уменьшается параметр закрутки потока  $w_{\max}/\langle u \rangle$  [1], сокращается область приосевого возвратного течения, которая при  $z_d > 6 \text{ cm}$  полностью исчезает (рис. 2). Вблизи границы касания плазмой стенки канала отмечается быстрое нарастание кондуктивного потока тепла  $Q_R$  (рис. 3), максимальная величина которого уменьшается с образованием приосевой зоны возвратного течения. С увеличением момента закрутки ( $M \sim G_1$  [6]) относительная длина отрыва потока от стенки в торцевой области уменьшается, например, при  $z_d = 4 \text{ cm}$ , высоте уступа  $\Delta h = R - R_d = 10 \text{ mm}$  изменениях  $G = 1 \div 6 \text{ g/s}$  в закрученном потоке  $L_{off}/\Delta h = 9.2 \div 1.6$ , в незакрученном —  $L_{off}/\Delta h = 9.2 \div 5.0$ . При  $z_d > 10R_d$  влияние закрутки на развитие потока за диафрагмой уменьшается и  $L_{off}/\Delta h$  возрастает. С увеличением степени диафрагмирования канала величина  $L_{off}/\Delta h$  возрастает в закрученном потоке и уменьшается в незакрученном.

В протяженных каналах осевая стабилизация дуги достигается путем последовательного расположения диафрагм по всей длине канала. Как показывают расчеты, для обеспечения стабильного течения

приосевого потока плазмы необходимо после каждой диафрагмы дополнительно вводить в канал закрученный поток газа, что реализуется в экспериментах [4].

Таким образом, численные исследования характеристик дуги в канале с катодным насадком показывают, что:

диафрагмирование канала в условиях интенсивной закрутки газа обеспечивает на участке до диафрагмы локализацию потока плазмы в узкой приосевой области с четкой тепловой границей раздела с внешним потоком газа (эффект вихревой термоизоляции плазмы); протяженность участка стабилизации зависит от размеров отверстия диафрагмы и ее положения в канале ( $z_d < 10R_d$  при  $R/R_d = 1.5$  и  $z_d < 20R_d$  при  $R/R_d = 3$ );

диафрагмирование канала без закрутки газа не обеспечивает термоизоляции дуги от стенок канала;

при отсутствии диафрагмы эффект вихревой термоизоляции плазмы не реализуется.

## Список литературы

- [1] Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука СО, 1975. 298 с.
- [2] Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Низкотемпературная плазма. Т. 17. Новосибирск: Наука, СП РАН, 1999. 712 с.
- [3] Михайлов Б.И. // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8. № 1. С. 133–141.
- [4] Аньшаков А.С., Жуков М.Ф., Тимошевский А.Н. и др. // 8-я Всесоюз. конф. по ГНТП. Новосибирск, 1980. Ч. 3. С. 57–60.
- [5] Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. Теория столба электрической дуги. Низкотемпературная плазма. Т. 1. Новосибирск: Наука СО, 1990. 376 с.
- [6] Бийбосунова Г., Лелевкин В.М., Ливенцов В.В. и др. Влияние гизодинамических характеристик на свойства электродуговой плазмы. Препринт ИАЭ-4697/6. М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. 16 с.
- [7] Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.