

УДК 537.523:533.924

Д.В.Иванов (асп. каф. ЭиЭ), С.В.Дресвин, д.т.н., проф., Нгуен Куок Ши, к.т.н., доц.

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВЧИ-ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА НА ОСНОВЕ ДВУХТЕМПЕРАТУРНОЙ МОДЕЛИ АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЫ

В настоящее время установки для спектрального анализа на основе ВЧИ-плазмотронов получили широкое распространение (в основном, за рубежом) в геологии, минералогии, металлургии и других отраслях промышленности, в научных исследованиях, а также в экологии (например, для контроля состава отходов производства) [1...3].

Особенностью ВЧИ-плазмотронов для спектрального анализа является то, что через центральную трубку в осевую область плазмы потоком транспортирующего газа вводится материал (в виде твердых частиц или жидких капель), состав которого необходимо выяснить. Этот материал испаряется и испускает спектры составляющих его веществ, которые фиксируются и анализируются с помощью специальной аппаратуры. Подача транспортирующего газа приводит к образованию холодного канала в приосевой области плазмы. Другие особенности таких плазмотронов: малые размеры, малая мощность, выделяемая в плазме (0.5...5 кВт).

Математическое моделирование ВЧИ-плазмотронов широко используется при разработке новых технологических процессов, а также для анализа работы существующих плазмотронов и выбора оптимального режима их работы [4, 5].

Как было показано в [6], существует два класса моделей плазмы: модели термической плазмы и модели неравновесной плазмы. Расчет ВЧИ-плазмотрона для спектрального анализа на основе равновесной (термической) модели был проведен ранее [7]. В данной работе рассчитывается тот же плазмотрон, но уже на основе неравновесной модели.

В используемой модели предполагается наличие ионизационного равновесия, но отсутствие температурного равновесия. Такая модель дает распределения температуры, которые лучше согласуются с экспериментальными данными, чем распределения температуры, полученные с помощью модели термической плазмы.

Основные допущения модели, а также дифференциальные уравнения, описывающие физические процессы в неравновесной плазме, могут быть найдены в работе [8]. Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений производится с помощью алгоритма SIMPLER, который был разработан Патанкармом [9]. Термодинамические и транспортные свойства двухтемпературной аргоновой плазмы определяются, как описано в [10] (с использованием формулы Потапова).

Рассматриваемый ВЧИ-плазмотрон для спектрального анализа работает на аргоне, частота  $f=28$  МГц, ток индуктора  $I=31.6$  А. Кварцевые трубки плазмотрона имеют следующие размеры: внутренний диаметр внешней трубки 24 мм; внешний диаметр – 28 мм; внутренний диаметр средней трубки 18 мм; внешний диаметр – 21.6 мм; внутренний диаметр центральной трубки 3 мм; внешний диаметр – 5.5 мм. Во всех трубках используется осевая по-

дача газа. Были рассчитаны два случая: без подачи транспортирующего газа:  $G_3=0$ ; и с подачей транспортирующего газа:  $G_3=3.4$  л/мин. Остальные потоки газа одинаковы в обоих случаях: защитный газ  $G_1=20$  л/мин, плазмообразующий газ  $G_2=2.4$  л/мин. Для расчетов использовалась неравномерная сетка ( $82 \times 41$ ). Длина расчетной области – 70 мм.

На рис. показаны радиальные распределения температуры тяжелой компоненты  $T_h$  и температуры электронов  $T_e$  в выбранных сечениях:  $z_1=1$  мм,  $z_2=11$  мм,  $z_3=22$  мм,  $z_4=35$  мм,  $z_5=47$  мм для случая  $G_3=0$  и для случая  $G_3=3.4$  л/мин.

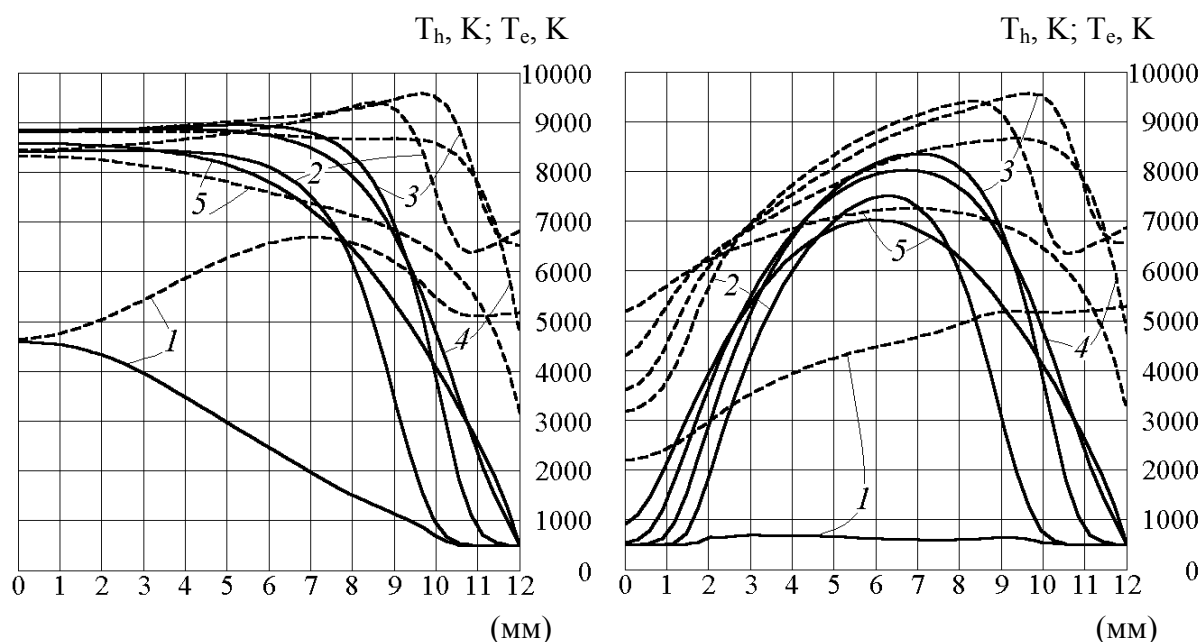


Рис. Радиальные распределения температуры тяжелой компоненты  $T_h$  (—) и температуры электронов  $T_e$  (----) в выбранных сечениях для случая  $G_3=0$  (слева) и для случая  $G_3=3.4$  л/мин (справа)

Из рис. видно, что в случае  $G_3=0$  термодинамическое равновесие нарушено только в пристеночной зоне, тогда как в приосевой зоне  $T_e \approx T_h$  (см. рис. слева). Подача транспортирующего газа (см. рис. справа) приводит к резкому нарушению термического равновесия и в приосевой области.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Дресвин С. В. Генераторы низкотемпературной плазмы // Энциклопедическая серия «Энциклопедия низкотемпературной плазмы»: Вводный том: В 4 кн. / Под ред. В. Е. Фортова. – М.: Наука, МАИК Наука/Интерпериодика, 2000. – Кн. 2. – с. 280-328.
2. Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy: Part 1 and 2 / Ed. P. W. J. M. Boumans. – New York: Wiley, 1987.
3. Inductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectroscopy / Ed. A. Montaser and D. W. Golightly. – 2<sup>nd</sup> ed. – New York: VCH, 1992. – 1017 p.
4. Boulos M. I., Barnes R. M. Plasma Modeling and Computer Simulation // Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy / Ed. P. W. J. M. Boumans. – Wiley, New York, 1987. – p. 289-352.
5. Mostaghimi J. and Boulos M. Mathematical Modeling of the Inductively Coupled Plasmas // In-

ductively Coupled Plasmas in Analytical Atomic Spectrometry / Ed. A. Montaser and D. W. Golightly. – 2<sup>nd</sup> ed. – VCH, New York, 1992. – p. 949-984.

6. Дресвин С. В. Основы теории и расчета высокочастотных плазмотронов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 312 с.

7. Иванов Д. В, Дресвин С. В., Нгуен Куок Ши. Расчет ВЧИ-плазмотрона // XXVIII неделя науки СПбГТУ. Ч.1: Материалы межвуз. конф.– СПб: Изд-во СПбГТУ, 2000. – С. 92-93.

8. Mostaghimi J., Proulx P. and Boulos M. I. A two-temperature model of the inductively coupled RF plasma // J. Appl. Phys. – 1987. – v. 61. – № 5. – p. 1753-1760.

9. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

10. Иванов Д. В, Дресвин С. В., Нгуен Куок Ши. Расчет свойств аргоновой плазмы при нарушении термического равновесия // XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч.1: Материалы межвуз. науч. конф. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, с. 90-91.