

## ТЕМПЕРАТУРА В СТРУЕ АЗОТНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

ГЕОРГ Э. Б., ЯКУШИН М. И.

Измерения температуры в плазменных струях на индукционных установках выполнялись в основном при атмосферном давлении в зоне энерговыделения. Плазмообразующими газами служили аргон и воздух [1–4]. Авторы работ делают вывод о существовании термического равновесия в этих условиях. Этот вывод нельзя перенести на плазменные струи при пониженных давлениях. В [5] говорится об отсутствии равновесия в струе азотной плазмы при давлениях  $p < 100$  мм рт. ст. Для давлений 100–300 мм рт. ст. наблюдается совпадение вращательной и колебательной температур, но вывода о существовании термического равновесия в плазме авторы не делают.

В настоящей работе исследовался дозвуковой поток азотной плазмы при давлениях 0,1 и 0,3 атм. Струя плазмы истекала из цилиндрического канала индукционного плазмотрона. Параметры струи: мощность 37,4 кВт, рабочий газ – азот, давление  $p = 0,1; 0,3$  атм, скорость потока на оси среза канала плазмотрона  $v = 175$  м·с<sup>-1</sup>. Мощность контролировалась по анодной цепи лампового генератора и поддерживалась постоянной. Азот в разрядный канал подавался из баллонов. Для получения спектров использовался монохроматор McPherson (дисперсия 8 А/мм). Изображения струи плазмы проектировалось на входную щель монохроматора. Для изучения радиальных распределений параметров ось струи располагалась перпендикулярно щели спектрографа. Характерное строение дозвуковой азотной струи – высокотемпературное ядро и слой смешения, состоящий в основном из молекулярных соединений азота. Спектральный состав азотной плазмы: полосы молекулы N<sub>2</sub>, иона N<sub>2</sub><sup>+</sup> и линии атомарного азота.

Измерение вращательной температуры для обоих давлений проводилось на основе распределения относительной интенсивности во вращательной структуре полос (0–1) –  $\lambda$  4278,1 А первой отрицательной системы (1<sup>-</sup>) иона N<sub>2</sub><sup>+</sup> и (0–0) –  $\lambda$  3371,3 А второй положительной системы (2<sup>+</sup>) молекулы N<sub>2</sub>. Вращательная структура полос N<sub>2</sub> и N<sub>2</sub><sup>+</sup> рассчитывалась на ЭВМ и затем проводилась идентификация спектров, полученных в эксперименте. Методика определения температуры по молекулярным полосам хорошо известна [6] и не приводится здесь. Точность определения «вращательной температуры» не превышает 15%.

В полосе (0–0) для давления 0,1 атм получены бальцовские распределения молекулы N<sub>2</sub> по вращательным уровням с температурой  $T = 5800$  К на срезе канала плазмотрона. При давлении  $p = 0,3$  атм получены завышенные значения температуры ( $T \sim 7000$ –8000 К), хотя и в этом случае распределение молекул N<sub>2</sub> подчиняется бальцовскому. По-видимому, это связано с эффектом реабсорбции, который проявляется в наиболее интенсивных линиях с низкими квантовыми числами. «Вращательную температуру» в полосе (0–1) (1<sup>-</sup>) N<sub>2</sub><sup>+</sup> измерить не удалось из-за отклонения распределения иона N<sub>2</sub><sup>+</sup> от бальцовского. На аномалии в распределении N<sub>2</sub><sup>+</sup> по вращательным уровням указывают авторы [7–9] и связывают их с изменением вращательной энергии при взаимодействии с медленными электронами и тяжелыми частицами. Настоящие измерения в полосе N<sub>2</sub><sup>+</sup> требуют использования аппаратуры с большим разрешением и дальнейшего уточнения.

Ранее для воздушной плазмы показано, что, несмотря на отсутствие равновесия в плазме, «вращательная температура» соответствует температуре газа. Поскольку и для азотной плазмы требуется небольшое число столкновений для установления равновесия между вращательными и поступательными степенями свободы, можно говорить о соответствии вращательной температуры газовой.

Температура, характеризующая возбуждение линий атомарного азота, определялась по ряду линий в спектральном диапазоне  $\lambda$  8200–8750 А. Ошибка измерений 3–5%.

На фиг. 1 представлены экспериментальные распределения температуры возбуждения (кривая 1) и газовой температуры (2) вдоль оси струи для давления  $p = 0,1$  атм. Начало координат совпадает со срезом канала плазмотрона.

Температурные зависимости прямолинейные, а падение газовой температуры вдоль оси струи несколько больше, чем температуры возбуждения. Однако можно считать, что в пределах точности измерений (~15%) газова температура и температура возбуждения совпадают.

Для давления  $p = 0,3$  атм профиль температуры возбуждения вдоль оси струи подобен профилю температуры для  $p = 0,1$  атм, а ее значения меняются в интервале  $6200 \text{ К} \leq T \leq 6600 \text{ К}$ . С ростом давления наблюдается увеличение слоя смешения, что обнаружено в [10] с помощью оптических интерферограмм дозвуковой струи. Увеличение слоя смешения приводит к распространению излучающих молекул N<sub>2</sub> и N<sub>2</sub><sup>+</sup> в периферийную область струи.

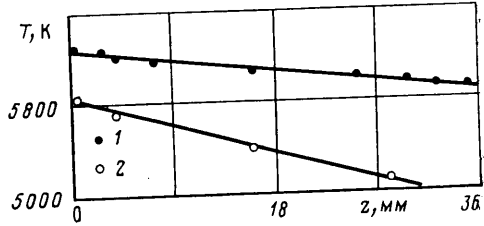
Для давления  $p = 0,1$  атм измерялись распределения интенсивности основных излучателей N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, N вдоль оси струи (фиг. 2). Излучение N<sub>2</sub><sup>+</sup> и N максимально

на срезе канала плазмотрона, а молекулы  $N_2$  — при  $z \geq 6$  мм. В сечениях  $z \geq 16$  мм наблюдается разброс экспериментальных данных для излучения молекул  $N_2$  и  $N_2^+$ , что, по-видимому, связано с искажениями при прохождении излучения через слой смещения.

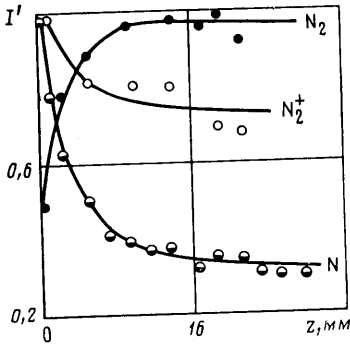
Зависимости относительных интенсивностей  $I' = I/I_{\max}$  для  $N_2$ ,  $N_2^+$ , N вдоль струи (фиг. 2) отражают поведение концентраций этих компонент.

На срезе канала исследовались радиальные распределения интенсивности излучения N,  $N_2$ ,  $N_2^+$  и температуры для выявления влияния неоднородности излучающего слоя плазмы. На фиг. 3 для среза канала плазмотрона приведены радиальные профили температуры возбуждения (кривые 1, 3) и температуры, определенной по абсолютной интенсивности вращательной линии в полосе  $0-0 \lambda 3371,3 \text{ \AA}$  второй положительной системы молекулы  $N_2$  (кривые 2, 4). Кривые 1, 2 относятся к давлению 0,3 атм, кривые 3, 4 — 0,1 атм. Температуры, измеренные двумя разными способами, в пределах экспериментальной точности совпадают.

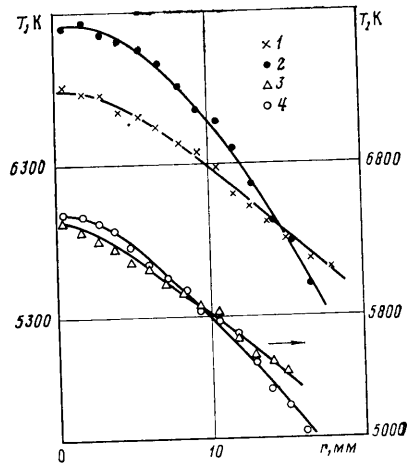
Как видно из графика, с увеличением давления возрастают яркость излучения и размеры ядра струи, так



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

как растет число соударений между частицами, а значит, и эффективность возбуждения атомов и молекул. Температура на оси разряда  $\sim 6800 \text{ K}$  ( $p=0,3 \text{ атм}$ ) и  $6450 \text{ K}$  ( $p=0,1 \text{ атм}$ ) превышает на  $150-200 \text{ K}$  значения температуры на оси, усредненные по лучу наблюдения, что находится в пределах экспериментальной ошибки. Следовательно, в данных условиях неоднородность струи слабо влияет на измерение температуры возбуждения атомных уровней.

Радиальные зависимости интенсивности излучения от давления имеют характер, сходный с температурными. Область свечения молекул азота гораздо шире светящейся области атомарного азота, т. е. излучение  $N_2$  и  $N_2^+$  распространено на периферийный слой смещения. Из сопоставления данных фиг. 3 и радиального распределения интенсивности излучения азота можно сделать вывод о том, что атомарный азот излучает из высокотемпературного ядра струи. Из этого следует, что температуру ядра можно измерять по излучению атомарного азота.

Для режима установки ВГУ-2 (мощность по анодному питанию генератора  $37,4 \text{ кВт}$ , расход азота  $2,8 \text{ г/с}$ , давление  $p=0,1 \text{ атм}$ ) на оси симметрии дозвуковой струи вращательная температура равна  $6400 \text{ K}$ , а эффективная температура газа, определенная по данным прямых измерений энталпии датчиком с протоком газа, —  $6200 \text{ K}$ . Таким образом, эти температуры практически совпадают, что подтверждает сделанный ранее вывод [11, 12] о соответствии вращательной температуры температуре газа.

Авторы благодарят В. М. Картвелишвили за помощь в проведении расчетов на ЭВМ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Eckert H. V., Kelly F. L., Olsen H. N.* Spectroscopic observations on induction-coupled plasma flames in air and argon.— *J. Appl. Phys.*, 1968, v. 39, № 3, p. 1846—1852.
2. *Бувечи Ю. А., Николаев В. М., Пластинин Ю. А., Сипачев Г. Ф., Якушин М. И.* Оптические свойства плазмы безэлектродного разряда в воздушном потоке.— *ПМТФ*, 1968, № 6, с. 111—114.
3. *Гольдфарб В. М., Гойцман В. Х.* Характеристики и возможные спектроскопические применения высокочастотного разряда при атмосферном давлении.— *Журн. прикл. спектроскопии*, 1968, т. 8, № 2, с. 193—196.
4. *Трехов Е. С., Фоменко А. Ф., Хошев Ю. М.* Температурные характеристики индукционного разряда в воздухе при атмосферном давлении без протока.— *Теплофиз. высоких температур*, 1971, т. 9, № 2, с. 429—431.
5. *Жестков Б. Е., Омелик А. И., Орлова З. Т.* Некоторые характеристики индукционного разряда пониженного давления в азоте.— *Теплофиз. высоких температур*, 1970, т. 8, № 4, с. 707—711.
6. *Герцберг Г.* Спектры и строение двухатомных молекул. М.: Изд-во иностр. лит., 1949. 404 с.
7. *Полякова Г. Н., Татусь В. И., Фогель Я. М.* Распределение ионов  $N_2^+$ , возникших при соударениях ионов с молекулами азота, по уровням вращательной и колебательной энергии.— *ЖЭТФ*, 1967, т. 52, № 3, с. 657—664.
8. *Очкин В. Н., Савинов С. Ю., Соболев Н. Н.* Распределение интенсивностей во вращательной структуре  $2^+$  системы  $N_2$  в газовом разряде. Препринт № 150. М.: ФИАН СССР, 1977.
9. *Мадина С. Ш.* Относительное распределение молекул  $N_2$  и  $N_2^+$  по вращательным и колебательным уровням возбужденных электронных состояний.— *Журн. прикл. спектроскопии*, 1980, т. 32, № 3, с. 419—425.
10. *Георг Э. Б., Гордеев А. Н., Труханов А. С., Якушин М. И.* Определение температуры в дозвуковой струе диссоциированного азота.— В сб.: Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. М.: Наука, 1985, с. 159—160.
11. *Георг Э. Б., Якушин М. И.* Измерение температуры газа в свободной дозвуковой струе воздушной плазмы в диапазоне давлений  $p=0,05-1$  атм. Препринт № 220. М.: ИПМ АН СССР, 1983.
12. *Георг Э. Б., Якушин М. И.* Температурные измерения в струе воздушной плазмы на индукционном плазмотроне при пониженных давлениях.— *Инж.-физ. журн.*, 1985, т. 48, № 1, с. 108—114.

Москва

Поступила в редакцию  
24.I.1985

УДК 531/534:0.61.3

### ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ АН СССР

#### СЕМИНАРЫ

Семинар по численным методам в задачах тепло- и массообмена под руководством В. И. Полежаева и Л. А. Чудова

13.II 1984. В. П. Плахотный, А. И. Простомолотов, А. И. Федосеев (Москва). *Метод конечных элементов: комплекс программ и приложения к задачам гидромеханики и теории упругости.*

Описан комплекс программ, реализующий метод конечных элементов для ЕС ЭВМ, приведены постановка и решения ряда задач гидромеханики (тепловая конвекция, вынужденные движения жидкости) и теории упругости в плоском и осесимметричном случаях.

20.II 1984. Н. В. Погорелов (Москва). *Численное моделирование идеального сверхзвукового обтекания тел сложной формы под большими углами атаки.*

Пространственное сверхзвуковое обтекание тела рассматривается на основе уравнений Эйлера для сжимаемого газа. Применяются явные и неявные конечно-разностные схемы, записанные в консервативной форме. Исследованы характерные особенности течений в широком диапазоне чисел Маха и углов атаки.

20.II 1984. Г. П. Мачис (Жаунас). *Метод расчета местных характеристик турбулентного теплообмена крупномасштабными структурами в автомоделльной части свободных сдвиговых течений.*

Представленный метод позволяет численно исследовать развитие в моногармоническом приближении как крупно-, так и мелкомасштабных пульсаций. Рассмотр-