

ЛУЧИСТАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРИСУТСТВИИ ЩЕЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Канд. физ.-мат. наук, доц. САНДРИГАЙЛО Л. Е.

Белорусский национальный технический университет

Примеси щелочных и щелочноземельных элементов применяются для стабилизации параметров плазмы дугового разряда, МГД-установок открытого цикла, появляются в плазме в результате ее взаимодействия с поверхностью твердых тел, входят в качестве добавок в состав твердотельных ракетных топлив. Предварительный выбор оптимальных режимов работы таких установок требует сведений по температурной зависимости коэффициентов переноса, в том числе и коэффициента лучистой теплопроводности примесей.

В настоящей работе ставится задача рассчитать коэффициенты лучистой теплопроводности щелочных элементов в зависимости от температуры плазмы и сопоставить их с аналогичными значениями для воздуха.

Коэффициент лучистой теплопроводности λ_L примеси равен сумме коэффициентов λ_{Li} отдельно взятых спектральных линий

$$\lambda_L = \sum_i \lambda_{Li}.$$

Величина λ_{Li} может быть найдена по формуле [1]

$$\lambda_{Li} = \frac{4}{3} \pi \int_{\nu_1}^{\nu_2} K_{\nu}^{-1} (dB_{\nu} / dT) d\nu,$$

где K_{ν} – коэффициент поглощения, рассчитанный в предположении фойгтовского контура линии; B_{ν} – спектральная яркость излучения абсолютно черного тела; $\nu_1 - \nu_2 = \Delta\nu_{in}$ – интервал частот, в пределах которого излучение спектральной линии является оптически плотным.

Как следует из [2, 3], при характерных размерах плазмы дугового разряда и концент-

рациях примесей плазму практически для всех нерезонансных линий упомянутых примесей можно считать оптически прозрачной, а излучение резонансных линий – рассматривать как излучение оптически плотного газа. Расчет степени ионизации по формуле Саха показал, что при $T \geq 5500$ К все указанные элементы практически полностью ионизированы. Следовательно, излучение атомов щелочных элементов при $T \geq 5500$ К практически отсутствует, а излучение даже резонансных линий ионов еще не наблюдается ввиду высокой энергии их возбуждения, величина которой $E_{1,ион}$ в зависимости от рассматриваемого элемента составляет $(15...30)E_{1,ат}$. Кроме того, на долю резонансных линий щелочных элементов при $T < 5500$ К в оптически прозрачной плазме приходится не менее 90 % всего излучения. По этой причине при подсчетах коэффициентов λ_L целесообразно ограничиться вкладом в перенос излучения только резонансных линий. При определении величины $\Delta\nu_{in}$ резонансных линий, как следует из [4], разумно принять значение $\Delta\nu_{in} = 40\gamma_D$, где γ_D – доплеровское уширение линий.

Результаты расчета величин λ_L для щелочных элементов при разных температурах приведены в табл. 1, элементы в которой расположены в порядке возрастания потенциалов их ионизации. Из табл. 1 следует, что при понижении температуры значения коэффициентов лучистой теплопроводности для каждого из рассматриваемых элементов резко уменьшаются, а при заданной температуре зависят от вида примеси – по мере роста потенциала ионизации коэффициенты λ_L уменьшаются. Из табл. 1 также следует, что с ростом потенциала ионизации

увеличивается и температура, начиная с которой величины $\lambda_{\text{л}}$ достигают заметных значений. Наибольшая величина $\lambda_{\text{л}}$ получена для элемента с самым низким потенциалом ионизации при $T = 5000 \text{ K}$.

Таблица 1

Результаты расчета коэффициентов лучистой теплопроводности щелочных элементов $\lambda_{\text{л}}$, Вт/(м·К), при различных температурах и концентрации примесей в плазме $n = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

$T, \text{ K}$	3000	3500	4000	4500	5000	5500
Cs	0,001	0,003	0,018	0,09	0,33	–
K	–	0,001	0,005	0,02	0,12	0,35
Na	–	0,001	0,004	0,01	0,17	0,24
Li	–	–	0,005	0,01	0,09	0,32
$\lambda_{\text{л}}/\lambda_{\text{в}}, \%$	0,1...1	0,3...1	1...5	5...15	15...50	3...12

Анализ результатов вычислений свидетельствует о том, что при заданной температуре плазмы с ростом концентрации частиц лучистая теплопроводность щелочных элементов заметно снижается.

Сопоставление рассчитанных коэффициентов лучистой теплопроводности щелочных элементов $\lambda_{\text{л}}$ с коэффициентами кондуктивной теплопроводности воздуха $\lambda_{\text{в}}$, усредненными по результатам экспериментальных и теоретических работ [5], показывает, что величина $\lambda_{\text{л}}/\lambda_{\text{в}}$ растет с увеличением температуры, достигая максимального значения вплоть до 0,5 при $T = 5500 \text{ K}$, а при дальнейшем росте температуры начинает резко уменьшаться. Следовательно, роль поглощения в формировании температурного профиля низкотемпературного источника плазмы с примесями щелочных элементов будет особенно заметной в области температур их максимального высвечивания.

Учет коэффициентов лучистой теплопроводности примеси при расчетах температурных профилей осесимметричной электрической ду-

ги, горящей в воздухе, позволил установить наличие практически плоского участка $T(r)$ в приосевой области дугового разряда, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [4].

ВЫВОДЫ

1. Лучистая теплопроводность щелочных элементов, применяемых для стабилизации работы плазменных установок, в области температур их максимального высвечивания сопоставима с кондуктивной теплопроводностью воздуха.

2. Рассчитаны коэффициенты лучистой теплопроводности элементов Cs, K, Na, Li в области температур 3000...5500 K.

3. Найденные коэффициенты могут быть полезными при выборе оптимальных режимов работы низкотемпературных источников плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаренко И. П., Паневин И. Г. Расчет стабилизированных каналов дуг с учетом переноса излучения и неравновесности плазмы // Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 61–67.
2. Сандригайло Л. Е. Об излучении плазмы при $T = 2000\text{--}7000 \text{ K}$ в присутствии примесей с низким потенциалом ионизации // Весці АН БССР. Сер. фіз.-мат. навук. – 1990. – № 3. – С. 119.
3. Сандригайло Л. Е. Влияние примесей на радиальное распределение температуры в плазме дугового разряда // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 1992. – № 5–6. – С. 73–77.
4. Сандригайло Л. Е. Влияние поглощения на радиальное распределение температуры в плазме дугового разряда // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 1999. – № 1. – С. 87–89.
5. Сандригайло Л. Е., Трухан Е. П. Расчет цилиндрической дуги в воздухе // Спектроскопия атомов и молекул в различных агрегатных состояниях. – Мн.: МГПИ, 1986. – С. 35–41.